

Pour la Science

Avril 1999



POUR LA

SCIENCE



édition française de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

*À quelle vitesse les espèces
apparaissent-elles?*



L'évolution des poissons



BLOC-NOTES

de Didier Nordon

5

TRIBUNE DES LECTEURS

6

JEU-CONCOURS

Soustractions curieuses

7

par Pierre T...



POINT DE VUE

Nécessité fait loi

8

par Mihai G...

LINGUISTIQUE APPLIQUÉE

Faits cosmiques et faibles masses

10

par le Vicomte Aumont



PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

Souvenirs d'un cryodinosau...

12

par M...



SCIENCE ET GASTRONOMIE

La saveur dans le cerveau

16

par Hervé This

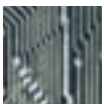


PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

20

- Venin thérapeutique? ■ La lumière lente
- Assurance biologique ■ Phèdre : les secrets de

l'interprétation ■ Mayo n'aise sans effort ■ Les voies de
l'hydrogène ■ Propriétés émergentes ■ L'origine des insectes
■ Mammographie numérique ■ Nouvelle espèce de rongeur
arboricole ■ Plantes trompeuses

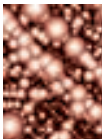


VISIONS MAJEURES

Graphes et électronique

96

par Ian Stewart



LOGIQUE ET MÉTHODE

Les chasseurs de nombres premiers

100



L'IMAGE DU MOIS

Les gouttes et le chaos

106

par S. Daugan, Y. Fautrelle et J. Etay



ANALYSES DE LIVRES

108

- Les mirages de la création, de M. Riordan et D. Schramm
- La culture est-elle naturelle? Histoire, épistémologie

et applications récentes du concept de culture, sous la direction
d'A. Ducros, J. Ducros et F. Jouliau

- Les insectes et la forêt, de R. Dajoz
- Copernic et la révolution copernicienne, de J.-J. Szczeciniarz
- Enfants, chercheurs et citoyens, sous la direction de G. Charpak
- Géographie des odeurs, sous la direction de R. Dulau et J.-R. Pitte
- Jeune chercheur, souffrance identitaire et désarroi social, d'I. Pourmir

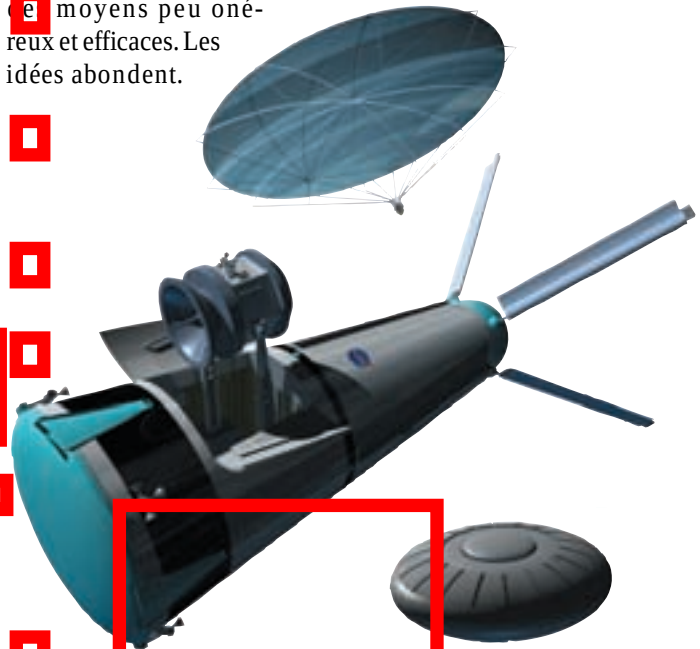
Le transport spatial du futur

36

par Tim Beardsley

Pour permettre l'exploration de l'espace lointain, les ingénieurs devront concevoir

des moyens peu onéreux et efficaces. Les idées abondent.



Le feu domestiqué

56

par Jacques Collina-Girard

Des expérimentations montrent que, contrairement aux idées reçues, deux silex ne peuvent allumer un feu, mais que la friction de deux bois de même dureté convient.



L'hypertension chez les Noirs d'Amérique

12

par Richard Cooper, Charles Rotimi et Ryk Ward

L'hypertension est fréquente chez les Noirs américains, et on lui attribue souvent une origine génétique.



La naissance des espèces

70

par **Melanie Stiassny**
et **Axel Meyer**

L'extraordinaire diversité des poissons du groupe des cichlidés éclaire les mécanismes d'apparition de nouvelles espèces.

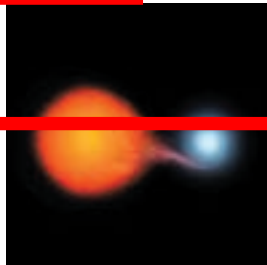


Les sources de rayonnement X mou

76

par **P. Kahabka, E. van den Heuvel** et **S. Rappaport**

Des systèmes d'étoiles doubles où une naine blanche arrache les couches externes de son compagnon émettent un rayonnement X de basse énergie.



Le développement des membres

84

par **Robert Nidic**
et **Clifford Tabin**

La protéine Sonic hedgehog qui commande le développement des membres chez l'embryon participerait aussi à l'apparition de certains cancers.

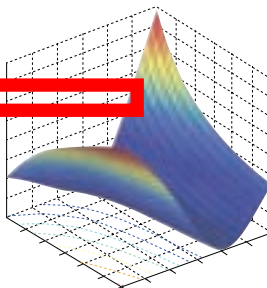


Mesures et information

90

par **Jacques Oksman**

Comment connaître des grandeurs qui ne sont pas directement observables? En les déduisant d'observations auxquelles elles sont reliées par des modèles.



ÉDITORIAL

La domestication du feu

Qui en doute encore? La conservation du feu du ciel, puis sa fabrication ont été deux moments clés de l'humanité. Il y a au moins 10 000 ans, d'après les plus anciens restes retrouvés, les hommes ont allumé le feu, non pas en imitant la nature – ils n'ont ni inventé, ni reproduit la foudre –, mais en utilisant leurs propres techniques, l'étincelle issue du choc de pierres adéquates et/ou le frottement de deux morceaux de bois (voir *Le feu domestiqué*, par Jacques Collina-Girard, page 56).

La maîtrise du feu était la première utilisation d'une énergie autre qu'organique (les protéines) ou mécanique simpliste (le choc d'une pierre pour briser des noix ou des os). Elle s'est, semble-t-il, amplifiée avec la sédentarisation du Néolithique, période définie par la pratique systématique de l'agriculture et de l'élevage, époque où l'espèce humaine a créé sa propre évolution. Dès lors, l'évolution du mode de vie humain ne résultait plus de la transformation aléatoire de gènes, mais de la possibilité de transmettre efficacement la connaissance et le savoir-faire, c'est-à-dire la culture. À cette époque, l'homme a aussi grandement développé le stockage de la nourriture dans les poteries et commencé à mettre au point des systèmes d'écriture pour communiquer.

Ce dialogue de connaissances entre l'Homme et la Nature s'est poursuivi avec fruit, et quelquefois les rôles ont été inversés. Les scientifiques ont inventé des outils inconnus qu'ils ont ensuite observés dans la nature. Nos ancêtres ont inventé la roue et l'hélice et ils ont ensuite noté que certaines bactéries les utilisaient. L'évolution les avait précédé, mais il a fallu le savoir scientifique pour s'en rendre compte.

Il n'empêche, tout cela est parti de « comment naît le feu », ainsi que le dirait notre ami le vicomte, amoureux de la Comtesse (voir l'article linguistique exceptionnel, page 10 de ce numéro).

PHILIPPE BOULANGER

Par Didier Nordon

Fautes de goûts

Le temps n'est plus où, pour être efficaces, les remèdes devaient avoir des goûts épouvantables. La mode est de leur en contredire les plaisants. Résultat : pour soigner une bronchite, une patiente de ma connaissance a dû, plusieurs fois par jour, avaler coup sur coup une poudre, un sirop, puis une solution respectivement aromatisés à l'orange, à la menthe, à la framboise. Notre amie ne s'est sortie de sa bronchite qu'au prix d'un solide écoulement.

Le danger d'administrer des médicaments incompatibles entre eux est connu des médecins depuis longtemps. Il va falloir que ces derniers apprennent à éviter un écueil de plus : ils devront désormais prescrire des remèdes dont les arômes forment ensemble un bouquet harmonieux.

«Si vous n'aimez pas ça...»

N'en dégoutez pas les autres.» Ce refrain, tiré de l'opérette *Là-Haut*, connaît une popularité justifiée. Le plus innocent de nos plaisirs de hearts aujourd'hui à l'avertissement d'un moraliste prétendant qu'il perd notre âme ou celui d'un hygiéniste affirmant qu'il ruine notre santé. Ils n'aiment pas ça ? Qu'ils n'essaient pas de nous dégouter.

Hélas, en ce bas monde, nous vivons entourés d'ennemis. Outre ceux qui n'aiment pas ça, il y a ceux qui aiment ça. Combien de fois devons-nous émerger de notre

sonnolence pour écouter au discours interminable tenu par un interlocuteur passionné de son sujet – sujet qu'il est bien sûr à ne pas devoir assombrir.

Qui, sans nous en rendre compte, nous entraîne à la mode échanter sur le même air un autre refrain : «Si vous aimez bien ça, n'en bassinez pas les autres !»

L'erreur était juste

Ombre, au hasard d'une lecture, sur la réponse à une difficulté qui ne vous avait jamais troublé est fort agréable. Si vous évitez d'avoir à poser la question et d'avoir à la résoudre. Coup double !

Voici donc la réponse : 1724. Voici maintenant la question : faut-il lire 1724 ou 1728 ?

Le cas où ce qui précède manquerait de clarté, voici enfin quelques détails. Dans la première édition des *Voyages de Gulliver*, Gulliver rapporte que les lilliputiens ont fourni une ration de nourriture équivalente à celle de 1724 lilliputiens. La seconde édition remplace 1724 par 1728, et les commentateurs considèrent en général 1724 comme une erreur d'impression.

Les lilliputiens étant 12 fois plus petits que Gulliver, leur volume est 1728 fois plus petit (le cube de 12 est 1728). Toutefois, un nouveau commentateur, Ralph Boas, s'élève contre cette interprétation. Swift décrit les lilliputiens comme aussi petits en esprit qu'en taille. Lorsqu'il dit qu'ils sont excellents mathématiciens, c'est ironique. La preuve, ils ne sont pas fichus de calculer le cube de 12. Il faut donc bien lire 1724, et non devant cette erreur grossière Swift a été victime d'un éditeur trop zélé.

Il faut donc bien lire 1724, et non devant cette erreur grossière Swift a été victime d'un éditeur trop zélé.

Il faut donc bien lire 1724, et non devant cette erreur grossière Swift a été victime d'un éditeur trop zélé.

Reconversion administrative

Abandonner la recherche pour l'administration n'est pas un travers nouveau chez les scientifiques. Dans *L'Avenir de la Science*, Renan fustige les savants qui tel Cuvier (1769-1830) perdent leur temps en tâches administratives. D'autres qu'eux s'en acquitteraient aussi bien, alors qu'eux seuls peuvent faire progresser la science. Exprimant sans nuance la hiérarchie entre les deux ordres d'activités, Renan écrit «Faire du torchon avec de la dentelle est un mauvais calcul» (chapitre XIII), et ajoute : «Un homme ne fait bien qu'une seule chose».

Toutefois, administrer est devenu d'une tâche complexe que la science, à côté, paraît presque un jeu d'enfant. Il est donc possible que le mouvement s'inverse bientôt : la coutume s'installe chez les jeunes gens brillants de carrière de se consacrer au travail administratif ; ensuite, fatigués et moins productifs sur le tard, de se reconverter dans la recherche.

Opinions ou informations

Longtemps, le bulletin interne de mon université a consisté en quatre pages d'annonces de conférences, tel jour à telle heure, telle soutenance de thèse, telle visite de collègue étranger, etc. À quoi s'ajoutait, en dernière page, un billet d'humeur signé par un collègue.

Or le billet d'humeur était toujours lu et scruté avec attention. En revanche, les informations factuelles, même encadrées en gras à la première page, avaient, le plus souvent, échappé aux regards.

Notre société ne vivrait plus désormais que pour et par l'information. Ce n'est pas sûr. Aujourd'hui, comme toujours, les opinions nous intéressent largement autant que les informations. Cette remarque est-elle une opinion ou une information ?

La trichotomie expliquée

C'est une erreur que d'avoir abandonné la notation des copies selon une échelle allant de 0 à 20 par quart de point. On ne peut guère imaginer système plus rationnel. Cette échelle fournit en effet 81 notes différentes possibles. Or 81, c'est 3 à la puissance 4. Voici donc comment corriger.

Première étape : partager le paquet de copies en 3 tas - les meilleures, les moyennes, les moins bonnes. Seconde étape : dans chacun des 3 tas, réitérer la même opération. Par exemple, dans le tas des meilleures copies, faire un tas avec les meilleures parmi ces meilleures, un avec les moyennes, et un avec les moins bonnes. À l'issue de la seconde étape, le paquet initial est ainsi divisé en 9 sous-paquets.

La troisième étape poursuit cette façon de faire, si naturelle, qui consiste à diviser un tas en 3 - les meilleures du tas, les moyennes, les moins bonnes ; d'où 27 sous-paquets. La même trichotomie, réalisée une quatrième et dernière fois, mène à 81 sous-paquets. Certains sous-paquets peuvent être vides, cela n'a aucune importance. Il ne reste plus qu'à procéder mécaniquement (c'est l'avantage de la méthode). Les copies se trouvant dans le tas des moins bonnes des moins bonnes des moins bonnes des moins bonnes obtiennent 0 ; celles se trouvant dans le tas des meilleures des moins bonnes des moins bonnes des moins bonnes obtiennent 1/4 ; et ainsi de suite par quart de point, jusqu'au tas des meilleures des meilleures des meilleures des meilleures, qui reçoivent un 20 sur 20 bien mérité.

Amortissement

L'article de Alain Oustaloup (voir *Les mathématiques de l'amortissement*, *Pour la Science*, novembre 1998) me rappelle le cours d'antennes que j'ai suivi à l'École supérieure d'électricité en 1966. À l'époque, on ne parlait pas encore de fractales, du moins pas dans les écoles d'ingénieurs, mais on savait que, pour obtenir des antennes à large bande, il faut utiliser des dispositifs autosimilaires. Une des méthodes consiste à enrouler un conducteur sur un cône, de façon qu'il fasse un angle constant avec les génératrices du cône. La projection de cette courbe sur le plan perpendiculaire à l'axe du cône est une spirale logarithmique, dont l'équation polaire est une exponentielle. Cette réalisation nous avait été présentée comme la mise en parallèle d'un grand nombre de dipôles élémentaires. L'une des antennes est accordée sur la fréquence du signal émis, les autres sont désaccordées et n'interviennent pas dans l'émission. Une bonne antenne introduit un faible taux d'ondes stationnaires dans la ligne qui l'alimente, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de réflexion des ondes à l'extrémité de la ligne. Vis-à-vis de la ligne, l'antenne se comporte donc comme un amortisseur des ondes qui s'y propagent.

Charles-Henri JOURDAIN, Frépillon

Réponse d'Alain Oustaloup

Le type d'antenne «amortissant» décrit par C.-H. Jourdain utilise le principe d'homothétie ou de similitude. Mais ce principe, qui assure une bonne adaptation d'impédance de l'antenne avec la ligne, se traduit par une impédance indépendante de la fréquence dans une large bande. Au contraire, l'interface eau-digue que je décris dans l'article présente une impédance qui dépend de la fréquence (le module est une puissance non entière de la fréquence). Quoi qu'il en soit, même si la description des phénomènes est différente, le principe d'homothétie des antennes est un facteur amortissant et mérite à ce titre d'être rapproché du principe de récursivité qu'utilisent à la fois la digue poreuse et la suspension CRONE.

Images de science

Je ne partage pas du tout le point de vue exprimé avec brio, mais aussi avec intransigence et, me semble-t-il, une certaine partialité, par Pierre Laszlo (voir *Pour la Science*, février 1999) sur le très bel ouvrage *Invisibles, images de l'inaccessible*, dont je recommande la lecture sans hésitation. P. Laszlo aurait effectivement raison d'être

négligé si le propos de l'auteur s'était concentré sur l'extraction de toute l'information pertinente de chacun des clichés présentés. Même si certains d'entre eux sont assez connus, on ne comprend pas bien pourquoi il les qualifie «d'éciculés» : nous continuons de nous émerveiller sur chacune de ces images, tout comme nous continuons à aimer le goût d'un plat succulent que nous avons l'habitude de déguster. Il est évident que, dans ce livre, grâce à la beauté des images scientifiques qu'il renferme, Patrice Lanoy cherche plutôt à nous faire réfléchir avec intelligence sur les rapports entre le visible et l'invisible, sur la nature de la lumière et sur l'incroyable aptitude de l'esprit humain à être abusé par ce qu'il voit.

Si l'on accepte ce parti pris, qui n'épuise évidemment pas tout ce que l'on peut penser et écrire sur le rôle de l'image dans la science, on peut rassurer P. Laszlo : le lecteur de cet ouvrage peut admirer ces images et comprendre que l'usage que le chercheur en fait est minime et risqué et difficile. L'énoncé de cette complexité même est au cœur du propos de P. Lanoy. En bref, ce livre dévoile une partie des beautés du monde scientifique sans en cacher les écueils.

Jean AUDOUZE, Paris

Réponse de Pierre Laszlo

Jean Audouze et moi sommes d'accord sur plus d'un point. Il mentionne «l'incroyable aptitude de l'esprit humain à être abusé par ce qu'il croit voir» : on ne saurait mieux dire. Le rationalisme que je suis, qui ne se lasse pas d'admirer les cochers de soleil, est allergique à toute mystification par des images, aussi belles soient-elles.

Analyses mathématiques

Dans *Négligeable, mais troublant* (voir *Pour la Science*, janvier 1999), Jean-Paul Delhaye trouve inquiétant que l'on ne dispose d'aucun exemple de nombre normal en toute base, bien que l'ensemble de ceux-ci soit pourtant dense. Par contre, selon lui, si nous disposons d'un seul exemple, tout serait parfait ! Pourquoi un seul exemple comblerait-il le vide entre «aucun exemple» et l'infini non dénombrable d'exemples possibles ?

Par ailleurs, il accorde à la physique un statut différent de celui des mathématiques : le physicien «n'accorde aucun sens à l'affirmation qu'il y a une infinité non dénombrable d'instantanés dans une seconde». Je suggère donc aux physiciens de rétablir toutes leurs théories sur des bases plus saines en évitant le

recours à cette chose bizarre appelée «analyse mathématique». La physique n'est pourtant pas exempte de paradoxes apparents (jumeaux de Langvin, paradoxe d'Einstein-Podolsky-Rosen), qui nous ont choqué plus d'un, et non des moindres, ainsi que d'objets inobservables (trous noirs, quarks isolés) ou encore inobservés (boson de Higgs), qui ont pourtant une importance capitale ! Je crois comprendre que J.-P. Delhaye a l'intuition que les outils mathématiques actuels, fondés sur la théorie des ensembles de Zermelo-Frenkel, sont inadaptes pour traiter des problèmes «purement numériques», tels que la conjecture de Goldbach, la convergence vers 1 de la suite « $3n + 1$ », etc. C'est fort possible, mais en ce qui concerne les nombres normaux en toute base, la théorie «classique» a donné une réponse claire, mais pas d'exemple (pour le moment). Je doute que changer les axiomes permette d'expliquer un tel nombre !

Fabien BESNARD, Paris

Réponse de Jean-Paul Delhaye

Un seul exemple de nombre normal en toute base comblerait le vide entre «aucun exemple» et «une infinité», pour la simple raison qu'avec un seul nombre normal en toute base, x , on pourrait tout le reste en construisant une infinité en considérant les nombres $x + n$, avec n un entier. Je continue donc d'attendre un seul exemple, sachant qu'il ne viendra pas seul !

Les idées mentionnées à la fin de l'article ne signifient pas que je préconise de tout mettre par terre car la situation est insatisfaisante sous certains aspects de vue. Ce que je disais, et qui, je crois, n'est pas toujours bien perçu par les mathématiciens, c'est qu'en plus de poursuivre l'utilisation de nos outils (les axiomatiques mathématiques usuelles), il ne faut pas oublier qu'on peut aussi les compléter ou même en explorer d'autres. Les physiciens hésitent moins que les mathématiciens à ces explorations radicales, et les mathématiciens à leur égard n'hésitent moins que ceux d'aujourd'hui. L'idée de nouveaux axiomes n'est pas absurde, et certains des travaux en théorie des ensembles que j'évoquais dans un article de *Pour la Science* de juin 1996 le montrent clairement. Quant à savoir si cela donnera des nombres normaux en toute base, je ne le sais pas plus que P. Besnard.

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* : tribune@pouirlascience.fr. D'autres contributions de lecteurs sont sur le site Web à <http://www.pouirlascience.fr>

JEU-CONCOURS N° 58

Soustractions curieuses

Prenez un nombre de quatre chiffres non tous égaux, comme, par exemple, 2 871. Formez, avec ces quatre

chiffres, le nombre le plus grand, soit 8 721, et le nombre le plus petit, soit 1 278. Calculez

la différence entre ces deux nombres, soit

$8\,721 - 1\,278 = 7\,443$. Avec ces quatre nouveaux chiffres, recommencez le procédé. On obtient ainsi 3 996, 6 264, 4 176. Enfin, avec 4 176, on forme $7\,614 - 1\,467 = 6\,174$, et le procédé s'arrête, car on obtient toujours 6 174.

En fait, quel que soit le nombre de départ (dont les quatre chiffres ne sont pas égaux), on converge vers 6 174. Si le nombre de départ comporte moins de quatre chiffres, on complète avec des zéros, non significatifs. Ainsi, 231 donnera $3\,210 - 0\,231 = 3\,087$, $8\,730 - 0\,378 = 8\,352$ et, enfin, $8\,532 - 2\,358 = 6\,174$. Comment démontre-t-on cette propriété?

On peut naturellement former toutes les combinaisons de quatre chiffres non tous égaux ; il y en a 705 (vérification aisée au soin du lecteur), et

tester la propriété sur ces 705 nombres!

Cependant, avec un peu de réflexion, on

peut diminuer notablement le

nombre de vérifications,

et ce sera l'objet du jeu-concours. Quel est le nombre minimum de tests à effectuer et quels sont les nombres à tester pour démontrer la propriété annoncée? Enfin, question subsidiaire : quel est, dans le cas le plus défavorable, le nombre de soustractions à effectuer pour arriver à 6 174?

sur carte postale à *Pour la Science*, 8, rue Frolo, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois d'avril 1999, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 56

Les lecteurs se sont répartis en quatre groupes principaux. Le premier s'est arrêté à 28, car il s'est interdit l'usage des parenthèses (ce que le texte du concours n'excluait pas) et, effectivement, pour 29, les parenthèses semblent inévitables comme, par exemple, $29 = 6 + 5 \times 5 - (9 + 5)/7$. Un deuxième groupe, beaucoup plus important (et dont je fais parti!) a buté sur 100, dont voici la solution : $100 = -6 \times 5 - 5 \times (9 - 5 \times 7)$. Un troisième groupe, beaucoup plus petit, s'est laissé arrêter par 121. Enfin, une grande majorité a atteint le nirvana, soit 124, dont voici les dix derniers :

- 115 = $6 + 5/5 + 9 \times (5 + 7)$
- 116 = $6 + 5 + 5 \times (9 + 5 + 7)$
- 117 = $(6 + 5 \times 5 - 9) \times 5 + 7$
- 118 = $(6 + 5 + 5 + 9) \times 5 - 7$
- 119 = $6 \times (5 \times 5 - 9 + 5) - 7$
- 120 = $6 \times 5 - 5 \times 9 \times (5 - 7)$

- 121 = $-6 + 5 \times (5 - 9 \times (5 - 7))$
- 122 = $-6 \times 5 \times 5 - (9 - 5) \times 7$
- 123 = $-6 \times 5 - 5 + (9 + 5) \times 7$
- 124 = $-6 + 5 + 5 + 9 \times (5 + 7)$

Une recherche informatique montre que les nombres non représentables sont 115, 145, 154, 164, etc.

Le nombre 655 957 ne semble pas avoir de propriétés très remarquables, hormis qu'il n'est pas premier : $655\,957 = 769 \times 853$ et qu'il peut se décomposer de deux façons, en somme de deux carrés, soit $726^2 + 359^2$ et $791^2 + 174^2$. Le nombre 6,55957 est le premier facteur de conversion de francs en euros.

Je voudrais néanmoins citer Monsieur Rémy Simon, pour le joli tour de force suivant : $655\,957 \times (555 - 5 \times 5 - 5) - 555 = 308\,299\,235$ s'écrit en base 26, quand on écrit 0, ..., 9, 10 = A, 11 = B, etc., **POGNON!!**

Nécessité fait loi

MIHAI GANCIU

Les expériences réalisables «sur table» favorisent la coopération scientifique et la transmission de savoirs

Avant 1994, les lasers X étaient d'énormes installations, composées de laser classiques puissants, qui émettaient une lumière visible, focalisée sur des cibles solides. Aussi la communauté des physiciens fut bouleversée d'apprendre que Jorge Rocca et ses collègues de l'Université du Colorado avaient construit un laser à rayons X qui tenait tout entier sur une table. Quel, une décharge électrique, dans un petit tube capillaire rempli d'argon, provoquait un effet laser à une longueur d'onde de 46,9 nanomètres, remplaçant ainsi les volumineuses installations de naguère !

Aujourd'hui les physiciens utilisent encore des systèmes classiques pour obtenir des faisceaux laser X de très courte longueur d'onde, mais de nombreux laboratoires explorent la piste ouverte par J. Rocca. Les progrès de ce type intéressent des physiciens de tous les pays, mais ils sont surtout vitaux pour des équipes dont les financements sont faibles. Je veux montrer ici, sur des exemples, que les difficultés financières qui nous limitent aux expériences «de table» sont une incitation à la coopération transdisciplinaire et internationale. Les scientifiques qui ont le moins de moyens sont

poussés à utiliser au mieux les ressources théoriques et à mettre au point des systèmes simples, qui profitent en retour à tous les laboratoires, riches ou pauvres. Inversement, les laboratoires des pays les plus riches peuvent collaborer avec les équipes démunies sur des projets légers.

Les résultats de J. Rocca ne nous sont pas étrangers : nous utilisons ses publications depuis longtemps et, à l'aide de décharges électriques, nous obtenons des faisceaux intenses de particules chargées, que nous dirigeons vers des cibles gazeuses ou solide. Pour obtenir de telles décharges, nous employons un matériel réduit au strict nécessaire : des écrans d'ordinateurs, par exemple, nous fournissent des tensions électriques de plusieurs dizaines de milliers de volts (il suffit de désosser l'appareil et de repérer la sortie du transformateur) ; et comme il est coûteux de faire des expériences dans le vide poussé, nous étudions les décharges qui sont produites dans des gaz à des pressions accessibles aux pompes à vide primaire.

Depuis 1990, nous collaborons avec des chercheurs russes et bulgares, avec qui nous avons mis au point des lasers à plasma de recombinaison. Dans ces systèmes, les décharges électriques ionisent un mélange de néon et d'hydrogène ; lors de la recombinaison des ions et des électrons, les espèces neutres qui se forment sont dans un état excité, qui conduit à un effet laser si les tubes à décharge sont placés dans une cavité optique (deux miroirs en vis-à-vis). Grâce à ces systèmes de table, l'équipe russe a vérifié les simulations numériques qu'elle avait mises au point pour l'étude des lasers à pompage nucléaire : des lasers de très grande dimensions, où le gaz actif, émetteur de faisceau laser, est excité par des particules subatomiques chargées, formées lors de réactions nucléaires. Comme la construction des lasers à pompage nucléaire est aujourd'hui presque abandonnée, nos collègues russes craignaient que leur travail n'ait été fait en pure perte, mais les systèmes de table ont été une solution salvatrice.

Dans des pays «riches», aussi, les systèmes de table s'imposent : le petit

laser que nous avons construit permet l'étude des recombinaisons de plasmas ; c'est ainsi que nous avons été conduits à collaborer avec Anne-Marie Pointu et ses collègues du Laboratoire de physique des gaz et des plasmas, à l'Université Paris-Sud. Dans ce cas, la simplicité de nos systèmes a permis de faire des expériences qui auraient été excessivement coûteuses et lentes, tandis que nos propositions des équipements perfectionnés d'analyse qui sont disponibles à l'Université et au CNRS.

De surcroît, les systèmes de table conduisent à des applications dont la portée aurait été très limitée si les phénomènes physiques mis en œuvre étaient restés attachés aux gros centres de recherche. Ainsi nous avons récupéré une partie des techniques de table qui avaient été mises au point lors de l'exploration des lasers à pompage nucléaire et montré que nos faisceaux électrons intenses, pulsés et bien collimatés, sont utilisables comme sources de rayons X, pour l'usinage des surfaces, pour le dépôt de couches minces, etc.

D'autre part, l'étude des processus d'excitation, d'ionisation et de recombinaison dans des gaz à haute pression a nécessité la mise au point préalable de décharges pulsées, dans des gaz à la pression atmosphérique ; ces décharges ont des applications inattendues : avec Alexandru Balaban et ses collègues de l'Institut roumain d'électrochimie, nous avons étudié l'effet de champs électriques intenses sur des fluides à surface libre (par exemple, des particules solides dispersées dans de l'huile s'alignent très rapidement quand on place la suspension de particules dans un champ électrique puissant). Cet effet permettrait une commande rapide de l'écoulement des liquides à surface libre qui éviterait des suites, en cas de rupture de canalisations contenant des gaz ou des liquides dangereux (voir la figure).

Aujourd'hui, les études de ce type, réalisables avec de petits systèmes, sont presque les seules possibles en Roumanie et dans d'autres pays où les financements de la recherche restent insuffisants. Grâce aux coopérations internationales, ces systèmes conduisent à des applications des résultats fondamentaux, tandis qu'ils donnent aux théoriciens l'occasion d'explorer les nouvelles voies.



L'écoulement d'un liquide est bloqué par une décharge électrique à la pression atmosphérique.

Mihai GANCIU est physicien au Département des plasmas froids de l'Institut de physique atomique INFAPR, à Bucarest. Il est également professeur invité de l'Université Paris-Sud.



Bien les énigmes de l'Univers mot-ter simultanément en jeu¹ d'énormes faits cosmiques et de minuscules grains qu'on découvre sans cesse.

Les problèmes de grandeur ont toujours fait bosser les chercheurs. Ils se sont penchés autant sur le bas d'échelle, ce qui implique des tailles très courtes et des faibles masses, que sur les cotes des comètes.

Se prêtant au jeu du néant, un néant fécond, Einstein, grand humaniste couvert d'honneurs dont la description des courbes nécessite beaucoup de veilles, a tordu l'atome immense. Il a dilaté les temps en les comptant. Mais il n'a pas vu l'extension de l'Univers que des expérimentateurs ont observée en captant des «bips», «bops» qui tombent sur la Terre. Un astronome colérique qui perdait son latin dès qu'il explosait et tenait alors d'incompréhensibles propos sur Saturne, un vrai sabir, a même prétendu qu'un effet Auger des profondeurs zénithales expliquait l'annihilation d'une nova ! On a vu une astrophysicienne vexée en parlant des rayons cosmiques sans valeur : on lui avait dit que sa glotte était pleine de muons. En revanche, d'autres chercheurs sensés qui savaient communiquer ont su exploiter ces messages spatiaux, et décoder avec un art consommé, comme le fit tel savant à tête de lion en découvrant ses pulsars.

En face de ces champions des fresques spatiales, chéris des chroniqueurs fréquentant assidûment leurs groupes, on trouve des spécialistes des particules qui testent sans cesse et sans fin. Ces physiciens font une sacrée tête dès qu'ils découvrent de beaux photons. Une spécialiste des quarks a trouvé beaucoup de sites pour la

«beauté». D'autres expertes maîtrisent parfaitement la réduction des sections efficaces et se montrent indulgentes envers les journalistes qui biffent «proton», ont des attitudes bêtes devant leurs kaons mais fêtent leurs pions. Et ils savent les emmener sur la piste des chimères.

Des lycéens sortant du bac en se demandant si l'Univers est clos, aux membres de l'Académie

dilatation car ils se demandent si l'habime se tasse, tous les scientifiques supputent les mêmes choses en prenant parfois de drôles de poses comme certains jeunes licenciés qui se font volontiers pompeux et se prennent au jeu des questionnaires. Quelles valeurs pour les spins²? Les champs sont-ils légers? Un astrophysicien à turban parle souvent de masse cachée.

Les chercheurs se branchent alors sans délai sur de grands mystères sans grandir de vider bien des poches. Il faut des navettes valant beaucoup plus d'un million et envoyer en l'air des cosmonautes qui se retrouvent décalés dès qu'ils sont en fusée. Mais il faut aussi de énormes anneaux où ce ne sont pas des vieux bus qui circulent en pure perte car aucun n'attend personne, mais où paraissent et se cognent à chaque instant avec une colossale énergie de drôles de particules par centaines de milliers. Bref, il ne faut pas cesser de payer, ce qui détermine une avalanche de coûts.

Ainsi, à Kamioka au Japon, les responsables internationaux d'une énorme expérience viennent de provoquer l'effroi des Nippons avec des coûts de taille. Mais cette débâche de béton va susciter beaucoup de thèses comme le montre l'équipe des chercheurs qui n'ont pas eu le temps de paraître et se font déjà connaître par le bruit de leurs chiffres.

C'est au bout d'une très longue prospection qu'a été lancé le germe des idées tant ces chercheurs étaient en quête de rare. Arrêtés bien des passages dans la

région de Kamioka, ils ont découvert une immense mine. C'était l'abysses dont ils rêvaient et qui suscita d'emblée de grandes envies de fêtes. Indépendamment du choix des Nippons, ils ont voté avant de se déployer dans des travaux dont ils se disputaient les places. Ils ont commencé par étayer l'abysses car de tels trous ne se comblent pas facilement, puis elle a été complètement pla-

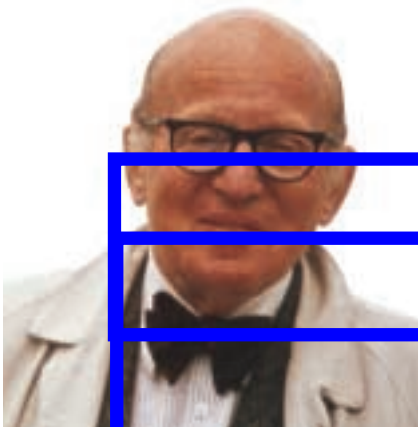
quée par l'équipe des chercheurs qui rêvaient de murs d'ambre. En définitive, après avoir fait l'habime, ils ont fait l'habile détecteur dont ils se sont servi à de multiples exemplaires pour tanner partout en le contentant de pain, car l'ascèse n'a aussi les bains étaient de rigueur. On se souillait facilement avant de pouvoir détecter ce qui était le but que couraient tous traqueurs de l'infime. Infimes ne furent pas les pannes mais ils finirent par arriver au bout et ce ne fut pas en treize ans.

Atteinte ce but devant lequel il ne carouillèrent jamais leur permet de mieux connaître l'effet des forces. Comment se transforme un neutron qu'on prend sur le nez? Mais aussi, comment notre Terre peut elle être tapée des milliards de fois par seconde sans qu'on ne sente rien, par d'invisibles grains-obus? Les hommes, eh bien, ont mis longtemps à trouver le neutrino. Puis ils l'ont vu de plus en plus léger mais ce n'est pas en le faisant chuter. A-t-il une masse et laquelle il en sont perturbés, car leurs femelles d'autant avec eux. S'il en a une et si elle est trop grosse, ce sera l'effondrement général car le monde pèse trop et finira brisé. S'il n'en a pas ou si elle est toute petite, le monde ne pèse pas assez et finira par s'emballer, tel une énorme bulle qui gonfle et poursuit pour l'éternité sans incroyable route.

Avec Kamioka et cette immense mine sans porosité, tout est désormais assésu. Quelques jaloux fustigent la «pègre de physiciens qui exhibent leur neutrino. D'après un spécialiste, c'est une vague célébrité du nom d'Aline qui parle ainsi de pègre et pourtant cette personne en a l'air à l'annonce : «Les neutrinos même magris émergent massifs du Soleil.»

1. Le mot «jeu» est souvent employé par un arrangeant spécialiste de Vernes (Vernes Jules) dont les fictions auraient, dit-on, effimé le règne.
2. Le grand spécialiste du spin est-il Fermi?
3. Le tout fut rempli par 50 000 tonnes d'eau et l'enlèvement des détecteurs (12 000 photons multiplicateurs) nécessiteront de nombreuses plongées (*Phrase normale, NDLR*). On mangeait, puis on rotait avant de plonger.

Les lecteurs trouveront, à partir du 1^{er} avril, sur le site internet de Pour la Science (adresse : <http://www.pour-lascience.com>) une traduction du texte du Vicomte et ses 104 figures de style (sauf horreurs ou émissions).



Souvenirs d'un cryodinosau

NICOLAS KURTI

L'aube du refroidissement magnétique.

La désaimantation adiabatique, une méthode qui permet d'atteindre des températures de quelques millièmes de degré au-dessus du zéro absolu ($-273,15^\circ\text{C}$), est née de l'erreur théorique de deux physiciens qui furent pourtant lauréats du prix Nobel. Etonné de leurs analyses erronées, le physicien allemand Franz Eugen Simon me poussa à des vérifications expérimentales qui nous conduisirent à la découverte de cette méthode, en 1956. L'évocation de nos études éclairer les débuts de la physique des basses températures, qui a récemment fleuri avec les explorations de la supraconduction.

Je me suis intéressé à la physique des basses températures en 1929, après ma licence, à la Sorbonne. Quand j'arrivais à Berlin, avec une lettre de recommandation pour Simon, la physique des basses températures était en plein essor.

Ce dernier avait commencé, très exactement, dans l'après-midi du 24 décembre 1877 : le chimiste Jean-Baptiste Dumas annonça à l'Académie

des sciences que l'oxygène venait d'être liquéfié presque simultanément, mais indépendamment, par Louis Cailletet, à Châtillon-sur-Seine, et par Raoul Pictet, à Genève. C'était un événement, car l'oxygène était alors un gaz prétendu « permanent », c'est-à-dire qu'on pensait impossible à liquéfier ; Cailletet et Pictet avaient obtenu l'oxygène liquide parce qu'ils avaient atteint une température plus basse que leurs prédécesseurs, -183°C .

Puis la physique des basses températures avait connu un autre grand moment en 1898, quand James Dewar, à Londres, avait liquéfié l'hydrogène à -252°C . En 1908, l'hélium liquide fut obtenu par H. Kammerlingh Onnes, à Leyde, à $-268,9^\circ\text{C}$; et, en 1932, William Keesom, également à Leyde, obtint un record de basse température de 0,7 kelvin (soit 0,7 degré au-dessus du zéro absolu) en faisant bouillir de l'hélium liquide sous vide : la réduction de la pression, au-dessus du liquide, facilite l'évaporation, ce qui abaisse la température

d'ébullition (en vertu du même phénomène le fait aboutit à des températures inférieures à 100°C , en altitude).

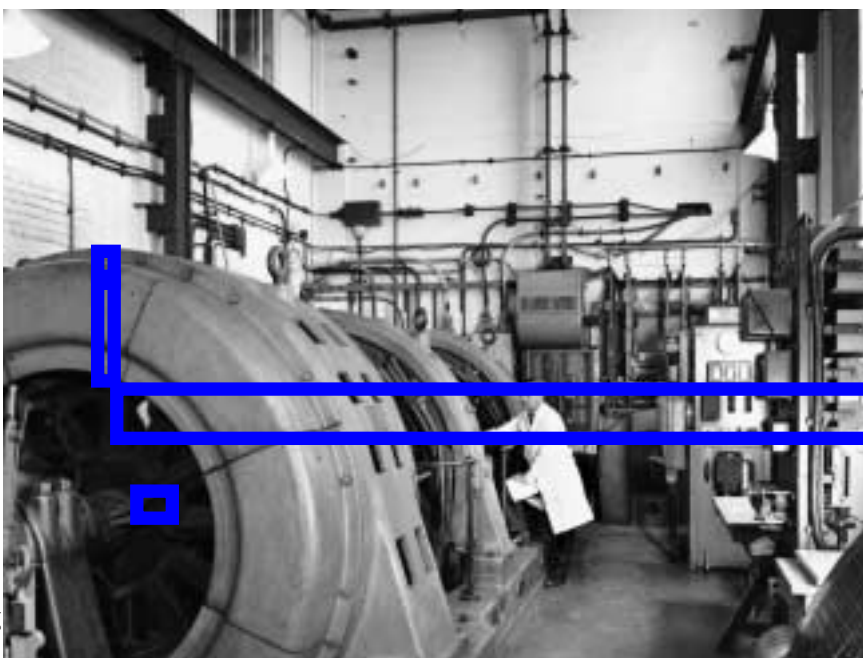
Aloors que les expérimentateurs atteignaient ainsi des températures de plus en plus basses, les théoriciens cherchaient à interpréter les phénomènes étranges qui apparaissaient dans ce monde où la matière s'immobilise progressivement.

À l'université de Leipzig, notamment, Peter Debye avait proposé théoriquement une nouvelle méthode de « refroidissement par désaimantation adiabatique » afin d'atteindre des températures encore inférieures. En décembre 1926, il publia

dans les *Annalen der Physik* un article intitulé « Quelques remarques sur l'aimantation à basse température ». Il se fonde sur des résultats obtenus trois ans plus tôt par Onnes et par H. Woltjer, qui avaient montré que l'aimantation d'un sel, le sulfate de gadolinium, varie en fonction du champ magnétique et de la température, conformément à une formule établie par Paul Langevin.

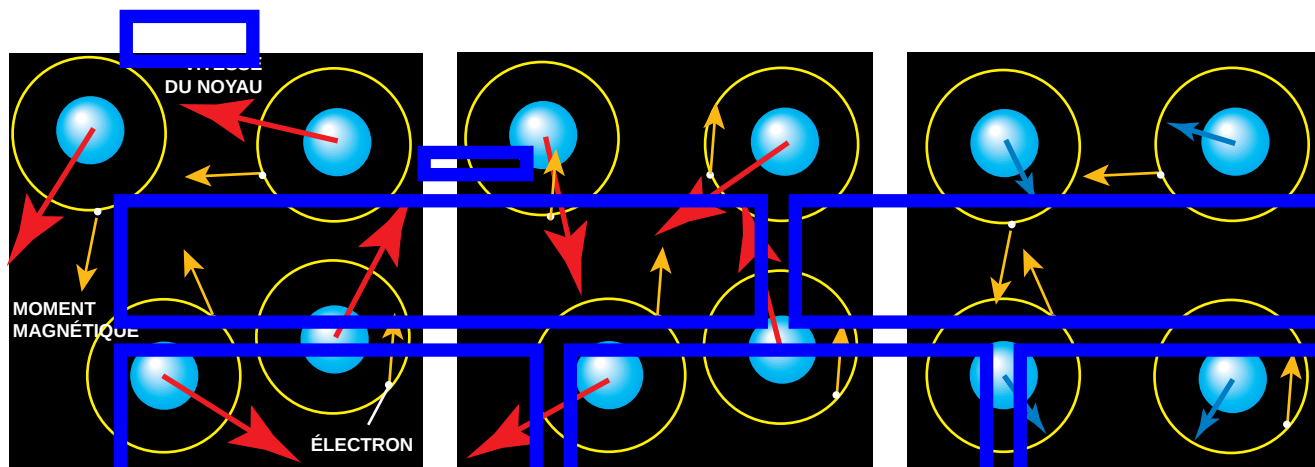
Appliquant les lois de la thermodynamique à la formule de Langevin, Debye calcule qu'aux températures où l'hélium est liquide, des champs magnétiques de quelques dixièmes de tesla ordonnent puissamment les moments magnétiques des électrons (responsables de l'aimantation) du sulfate de gadolinium.

Que se passe-t-il si l'on aimante d'abord le sulfate de gadolinium de façon isotherme, c'est-à-dire à température constante, puis si l'on réduit ensuite lentement le champ magnétique, la substance étant isolée thermiquement de son environnement ? Lors de la désaimantation, réversible et adiabatique (c'est-à-dire sans échange de chaleur entre l'échantillon et son environnement), l'entropie (le désordre) est constante : à mesure que les moments magnétiques des électrons se désordonnent, leur entropie augmente, mais le désordre des atomes doit diminuer d'autant ; comme la température dépend du mouvement des atomes, le cristal de sulfate de gadolinium doit donc refroidir (voir la figure 2).



Photographie de N. Kurti

1. Ce générateur électrique alimentait les bobines qui engendraient les champs magnétiques de trois teslas, en 1956, à Oxford.



2. Le principe de la désaimantation adiabatique électronique. En maintenant la température constante, on applique un champ magnétique (au centre) qui aligne les aimantations des électrons (flèches orange). Puis on supprime le champ magnétique (à droite) : le désordre créé par la désorganisation des aimantations des électrons est

compensé par un ordre accru des noyaux atomiques (les flèches sur les noyaux représentent leur vitesse). L'augmentation de l'ordre atomique correspond à un refroidissement. L'auteur et ses collègues d'Oxford ont testé cette même méthode, mais en utilisant l'aimantation des noyaux atomiques au lieu de l'aimantation des électrons.

Ayant estimé la chaleur spécifique du réseau (la quantité de chaleur qu'il faut fournir pour chauffer de un degré un gramme de sulfate de gadolinium), Debye calcule qu'à la température de quatre kelvins une désaimantation à partir d'un champ magnétique même faible doit amener l'échantillon à la température du zéro absolu. Toutefois, Debye connaît le troisième principe de la thermodynamique, qui stipule que la température du zéro absolu est inaccessible, et il rejette son calcul : « Il faut conclure que la formule de Langevin n'est plus valable à ces températures » ; il n'explique pas pourquoi.

Huit mois plus tard, à Berkeley, William Francis Giauque publie un autre

article sur le même sujet, sous un titre analogue. L'article ayant été reçu par l'éditeur le 14 décembre 1926, il a certainement été écrit avant la publication de l'article de Debye : ce n'est pas un plagiat. Dans une note de bas de page, Giauque explique qu'il a discuté de ses idées avec des collègues depuis 1924, et il mentionne la première annonce publique du résultat, faite à une réunion de la Société américaine de chimie, en avril 1926, c'est-à-dire six mois avant la remise du manuscrit de Debye.

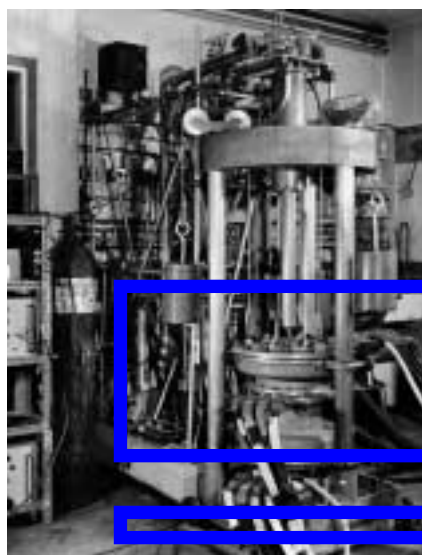
En appliquant les lois de la thermodynamique à la formule de Langevin, comme le fait Debye après lui, Giauque envisage tout d'abord un réfrigérateur magnétique fondé sur des cycles magnétiques (une alternance de phases adiabatiques et de phases isothermes), répétés aux températures inférieures à un kelvin, puis il signale qu'une seule désaimantation adiabatique électronique devrait conduire à de très basses températures.

C'est à ce moment que j'arrive à Berlin : au cours de l'été 1929, j'appelle Simon pour lui demander de faire ma thèse sous sa direction dans le domaine du magnétisme et des basses températures. Il accepte et me propose de tester expérimentalement la prévision théorique de désaimantation adiabatique. Nous étudions les articles de Debye et de Giauque, et Simon fait le raisonnement suivant : dans une substance obéissant à la loi de Langevin, les moments magnétiques des électrons sont orientés au hasard, en l'absence d'un champ magnétique extérieur ; l'entropie magnétique est notable. D'autre part, selon le troisième principe de la thermodynamique, l'entropie est nulle à la température du zéro absolu. Or le passage

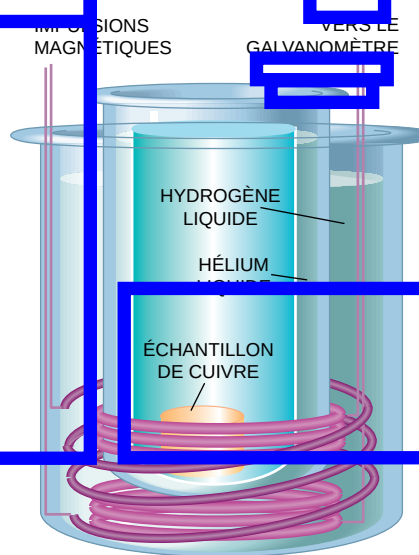
d'une température à l'autre s'accompagne d'absorption d'énergie : cette augmentation d'énergie correspond à une forte chaleur spécifique magnétique, que Simon me propose de mesurer.

À cette époque, le gadolinium est une terre rare, mais Georges Urbain, pionnier de la chimie des terres rares, nous confie 500 milligrammes de sulfate de gadolinium. Sur cet échantillon minuscule, nous vérifions la prévision de Simon. Nos mesures permettent de prévoir les résultats des désaimantations adiabatiques électroniques : les premières expériences de Giauque, en 1933, montrent que nos prévisions sont exactes.

Ainsi deux futurs prix Nobel (Debye et Giauque) ont prévu théoriquement le



3. L'appareil qui permet d'observer la première désaimantation adiabatique nucléaire renfermait un échantillon de cuivre, dans un système de bobines qui détectaient le refroidissement. L'ensemble était successivement refroidi par de l'hydrogène liquide et par de l'hélium liquide.



4. La mesure de la température de l'échantillon refroidi (du cuivre) était assurée par un système de trois bobines. L'une, externe, assurait la désaimantation, tandis que deux bobines internes, identiques, étaient reliées à un galvanomètre. L'aimantation de l'échantillon provoquait la déviation du galvanomètre.

PART C From Art Spohr's lab Notebook

04450' Current into 200 amperes / sec

51.50 Begin reducing

52.00 Demagnetize

15 B 1.15 76/100 = A ?

30 1.00 141

45 0.61 122

55 0.39 120

55 10 0.39 120

Note added in 1990.

Experiment done during the night

6-7 June 1956.

N. Kurti

5. Le carnet de laboratoire qui consigne les résultats de la première expérience de désaimantation adiabatique nucléaire, à l'Université d'Oxford.



6. Francis Simon (à gauche), Art Spohr (au centre) et Neville Robinson (à droite) travaillent avec l'auteur, en 1956.

refroidissement par désaimantation adiabatique électronique, mais leur raisonnement était faux, parce qu'il supposait implicitement que l'on pourrait atteindre la température du zéro absolu.

Où était l'erreur ? Même si l'on annule le champ magnétique externe, chaque moment magnétique reste dans un champ magnétique local (qui peut d'ailleurs varier selon les points de l'échantillon), dû aux moments magnétiques voisins. Une désaimantation complète est donc impossible, et la température minimale que l'on peut atteindre est déterminée par l'intensité du champ local.

Comment obtenir des températures encore inférieures ? L'explication précédente fournit la réponse : on doit utiliser des substances où le champ magnétique local est inférieur. Ces substances sont celles dont le magnétisme est dû aux moments magnétiques des noyaux atomiques, qui sont 1 000 fois inférieurs à ceux des électrons.

Les tests expérimentaux de désaimantation nucléaire ne commencent qu'au début de 1955 : avec Neville Robinson, Simon et Art Spohr, nous utilisons du cuivre métallique, à une température

initiale de 10 millikelvins, produite par désaimantation électronique. Un solénoïde alimenté par une puissance de deux mégawatts exerce un champ magnétique maximal de trois teslas.

Pour déterminer la température atteinte, nous mesurons l'aimantation à l'aide d'un système composé de deux bobines enroulées en opposition : l'échantillon est dans une seule des bobines, et tout le système baigne dans l'hydrogène liquide, qui entoure le cryostat à l'aide d'hélium liquide. Quand la bobine extérieure produit un petit champ magnétique de dix milliteslas, l'aimantation de l'échantillon provoque un déséquilibre du circuit électrique composé par les deux bobines ; un galvanomètre balistique mesure ce déséquilibre.

Toutefois, lors de nos premières expériences de refroidissement nucléaire, en mars 1956, nous n'observons aucune déviation du galvanomètre : nous ne pouvons donc pas savoir si nous avons obtenu un refroidissement de l'échantillon.

C'est seulement dans la nuit du 6 au 7 juin 1956, vers trois heures du matin, qu'en désespoir de cause, je me tourne vers A. Spohr et lui dis : « Art, nous avons tenté tout ce qui était raisonnable, mais

nous n'avons eu aucun résultat. Je propose donc de faire un peu n'importe quoi, pour voir ce que ça va donner. Par exemple, au lieu d'inverser le champ primaire contre plus dix milliteslas et moins dix milliteslas, si nous tentions une valeur de un millitesla ? » Nous faisons l'essai et, après des mois de travail, nous observons une déviation du galvanomètre qui correspond à une température d'environ dix microkelvins. Une autre désaimantation confirme le résultat. A. Spohr écrit dans le cahier de laboratoire, à côté du compte rendu d'expérience : « Nous y voilà !! ? ? ». C'est le premier refroidissement par désaimantation adiabatique nucléaire.

Nous comprenons ultérieurement la raison de nos échecs répétés. Le courant dans la bobine primaire est lancé juste après la désaimantation, mais la première observation du galvanomètre n'est faite que lors de l'inversion du courant. Or l'établissement du courant dans la bobine primaire induit des courants de Foucault qui chauffent momentanément l'échantillon à quelques dixièmes de kelvins. En réduisant le champ de la bobine primaire de 10 à 1 millitesla, on réduit ce chauffage d'un facteur 100.

En 1960, quelques années après ces premières expériences, la BBC présente quelques travaux effectués au Laboratoire Clarendon d'Oxford et, notamment, une expérience de désaimantation adiabatique nucléaire. À la fin de l'émission, le présentateur remarque que ces expériences battaient le record des basses températures, et je réponds : « Je n'aime pas l'expression "records de basses températures". Il serait insensé que des physiciens des basses températures courent après le zéro absolu, qui est inaccessible. Ces expériences sont importantes parce qu'elles nous ont amené au seuil de régions de températures nouvelles, et j'espère seulement que nous serons désormais capable d'explorer ce pays d'ordre et de calme, ce monde sans chaos. »

Depuis, notre « record » a été largement battu, et plusieurs expériences allant même au-dessous de un nanokelvin ont prouvé qu'il existe des oasis dans le désert glacial des microkelvins, nanokelvins et picokelvins.

Nicholas KURTI était professeur de physique à l'Université d'Oxford et membre de la Royal Society ; il a travaillé au Laboratoire Clarendon jusqu'à sa mort, en novembre 1998.



La saveur dans le cerveau

HERVÉ THIS

Par résonance magnétique nucléaire, on identifie les aires activées lors de la perception des saveurs.

« Comme jusqu'ici ne s'est encore présentée aucune circonstance où quelque saveur ait dû être appréciée avec une exactitude rigoureuse, on a été forcé de s'en tenir à un petit nombre d'expressions générales, telles que doux, sucré, acide, amer, et autres pareilles, qui s'expriment, en dernière analyse, par les deux suivantes : agréable ou désagréable au goût. Ceux qui viendront après nous en sauront davantage. »

Jean-Anthelme Brillat-Savarin était prescient, puisque les neurobiologistes sont aujourd'hui sur la piste des molécules réceptrices des saveurs, à la surface des cellules des papilles. Simultanément, les techniques d'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM) révèlent comment l'information perçue par les capteurs du goût monte au cerveau, où elle est alors traitée.

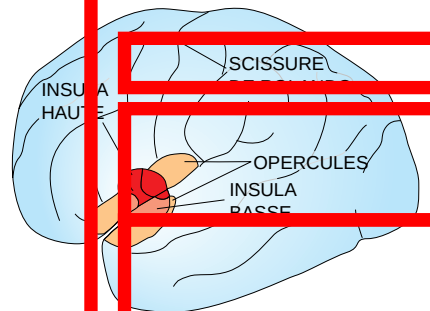
Depuis la mise au point de ces techniques, qui enregistrent l'activité des aires cérébrales en détectant les modifications du débit sanguin dans ces zones, les neurobiologistes ont surtout étudié des activités cognitives comme le langage, le calcul, la mémorisation. En revanche, l'olfaction a été peu explorée, et la perception des saveurs complètement oubliée (on la note gustation, mais, comme le goût est la sensation générale donnée par la dégustation d'un mets, on devrait plutôt la nommer « sapiction »). Barbara Cerf et Annick Faurion, du Laboratoire de neurobiologie sensorielle de Massy, et Denis Le Bihan, du Centre hospitalier d'Orsay, ont identifié les aires cérébrales activées par les molécules sapistes.

Les connaissances de base étaient rudimentaires. On savait seulement, par l'observation de personnes dont une partie du cerveau avait été détruite, au cours de la Seconde Guerre mondiale, que l'opercule pariétal, près de la scissure de Rolando, avaient sans doute une fonction dans la gustation. Toutefois des études d'électrophysiologie donnaient des résultats contradictoires : elles incrimaient plutôt une autre aire, localisée dans le lobe de l'insula.

Les explorations par IRM imposent d'allonger les sujets testés dans un tube de deux mètres de long, et, de ce fait, de les alimenter par des solutions transmises par des tuyaux souples. Ces contraintes ont déterminé le type de produits sapides qui ont été testés : les sujets recevaient des solutions d'aspartame (un édulcorant), de chlorure de sodium, de quinine (amère), d'acide glycyrrhizique (une saveur « réglisse ») de guanosine monophosphate (la saveur umami, proche de celle du monoglutamate) et de d-thréonine (une saveur « désirable, je vous recommande l'expérience ! »). Les expérimentateurs envoyaient d'abord aux sujets de l'eau, puis des solutions sapides, puis de nouveau de l'eau, et ainsi de suite, afin d'éviter les adaptations tout en maintenant des stimulations durant plusieurs dizaines de secondes, le temps que l'appareil d'IRM puisse acquérir suffisamment de signal.

Les sujets qui recevaient ces solutions avaient pour mission de se concentrer sur leur saveur, afin d'éviter des activations parasites du cerveau. Ils décrivaient l'intensité de leurs sensations à l'aide d'un curseur qu'ils déplaçaient plus ou moins le long d'une règlette. Les neurobiologistes ont calculé des corrélations entre les profils perceptifs et les activations de diverses zones du cerveau. Ils ont ainsi déterminé les activations liées à la perception des saveurs : les différences entre individus sont considérables, et les images sont bruitées, de sorte que l'on doit analyser de nombreuses expériences afin de connaître les aires qui seraient spécifiques de la perception de la saveur.

Les premières études ont montré que quatre aires cérébrales ont des activations suscitées par les solutions sapides : le lobe de l'insula et les opercules frontal, pariétal, temporal qui l'entourent (voir la figure ci-dessus). Il n'existe ainsi pas un unique « centre cérébral de la saveur » ni d'aires cérébrales spécifiques des diverses saveurs. D'autre part, certaines des aires qui n'étaient pas systématique-



Les aires cérébrales stimulées lors de la perception des saveurs.

ment activées participent à la compréhension du langage : d'où l'hypothèse que la détection de la saveur soit associée à sa nomination.

Une deuxième étude, qui comparait cinq gauchers et cinq droitiers, a montré que les quatre aires cérébrales de la saveur n'étaient pas systématiquement inversées dans les deux groupes. En revanche, l'insula était stimulée différemment chez les divers individus (voir la figure en haut à gauche). Cette aire est composée de deux régions : la partie haute est activée dans les deux hémisphères, pour les droitiers comme pour les gauchers ; la partie basse s'active plutôt de façon unilatérale dans l'hémisphère dominant des sujets (flèche). Il existe ainsi une latéralisation de la perception de la saveur analogue à celle du langage ou de la motricité.

Une troisième série d'études a comparé la réaction à des molécules uniquement sapistes, et la réaction à des molécules à la fois sapistes et astringentes ou piquantes. Cette fois, les aires activées étaient analogues, ce qui explique pourquoi le goût, la sensation générale obtenue lors de la dégustation d'un mets, est une sensation si globale et si difficile à analyser : le cerveau construit une sensation globale à partir des signaux provenant des divers types de récepteurs.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 27 avril 1999, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.

Venin thérapeutique ?

Une toxine extraite d'un coquillage des mers chaudes semble améliorer la contraction des muscles.

Leurs coquilles charment les collectionneurs et leurs venins fascinent les biologistes : les cônes, coquillages des mers chaudes harponnent leurs proies – des poissons, des vers ou d'autres mollusques – en les paralysant grâce à un venin qu'ils décochent par une flèche. Cette dernière est une dent creuse, pleine de poison, qu'ils projettent vers l'animal convoité. Frédéric Le Gall et Philippe Favreau, dans l'équipe de Jordi Molgó, au laboratoire de neurobiologie cellulaire et moléculaire du CNRS, à Gif-sur-Yvette, ont isolé une toxine de venin de cône qui stimule la contraction des muscles. Aura-t-elle un jour une application thérapeutique chez les malades dont la contraction musculaire est insuffisante ?

Les venins des cônes contiennent plusieurs toxines, les conotoxines, qui agissent en se liant à leurs récepteurs spécifiques,

notamment ceux des jonctions neuromusculaires. Ces jonctions sont les zones de contact entre les fibres musculaires et les axones des neurones qui se ramifient en fins prolongements à leur voisinage. La terminaison du neurone présynaptique qui véhicule l'influx nerveux est séparée de la fibre musculaire, postsynaptique, par une fente synaptique. La communication est assurée par des messagers chimiques, les neurotransmetteurs. Les récepteurs des toxines sont souvent des canaux ioniques, des « pores moléculaires » qui, en contrôlant le passage des ions (sodium, calcium et potassium), assurent la propagation de l'influx nerveux.

Normalement, lorsque le signal propagé par l'axone arrive à la terminaison présynaptique, des canaux sodium, localisés sur cette terminaison, s'ouvrent, et des ions sodium y entrent : cela déclenche l'afflux d'ions calcium, puis la libération de molécules d'acétylcholine (un neurotransmetteur) dans la fente synaptique. En se liant à leurs récepteurs (dits nicotiniques, car ils fixent aussi la nicotine) situés sur la membrane postsynaptique, les molécules d'acétylcholine déclenchent l'ouverture des canaux sodium de la fibre neuromusculaire postsynaptique. L'entrée d'ions sodium active

la propagation du signal, qui se manifeste par une contraction musculaire. L'acétylcholine agit de façon très transitoire et, quand elle se détache de son récepteur, le canal sodium postsynaptique se ferme et la contraction cesse.

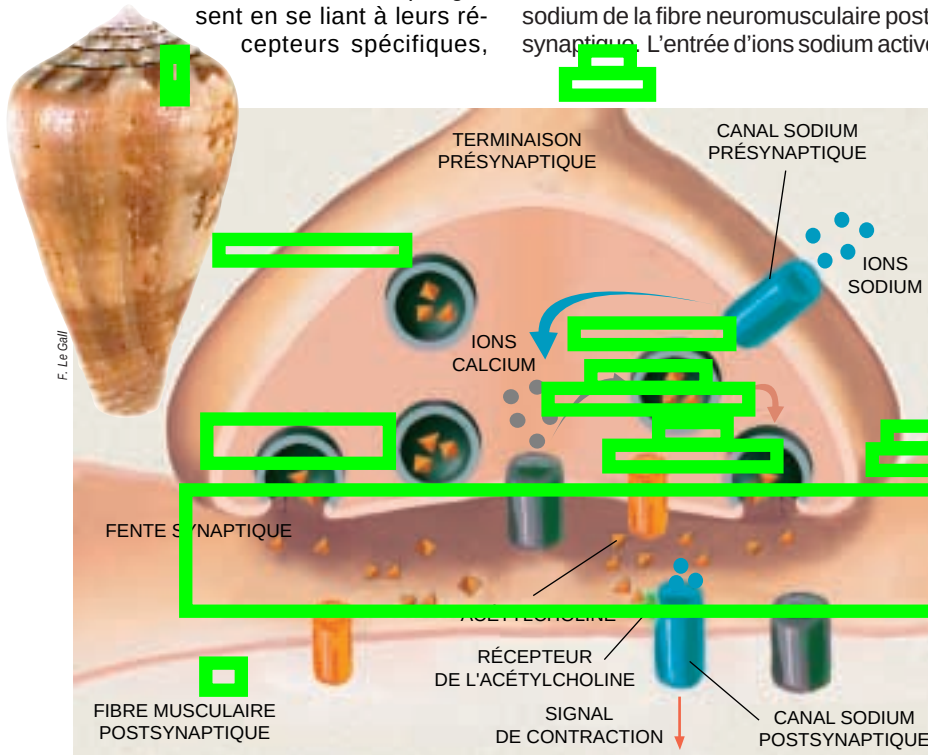
En bloquant sélectivement certains canaux ioniques, la plupart des conotoxines inhibent la transmission de l'influx nerveux, provoquant une paralysie flasque. En revanche, dans le cas du *Conus ermineus* du Sénégal ou des Caraïbes, le venin provoque une paralysie rigide : l'influx nerveux ne cesse de se propager, et la paralysie a lieu par une contraction ininterrompue des muscles. F. Le Gall et P. Favreau ont extrait de ce venin une toxine, nommée E6A, qui se lie spécifiquement aux canaux sodium du neurone présynaptique et les maintient sans cesse ouverts. En inhibant leur fermeture, elle entraîne une libération prolongée de bouffées d'acétylcholine : l'influx nerveux est transmis de façon répétée et la fréquence des contractions musculaires s'accroît.

Toutefois, seule E6A ne provoque pas de paralysie rigide ; d'autres toxines du venin de *Conus ermineus*, agissant en synergie avec elle, sont nécessaires.

Cette toxine devrait avoir des applications intéressantes pour lutter contre certaines maladies neurodégénératives, des myasthénies, caractérisées par une diminution de l'excitabilité des nerfs moteurs, c'est-à-dire par une baisse de la contractilité des muscles. Une molécule ayant les propriétés de E6A pourrait normaliser une conduction nerveuse insuffisante. Des molécules nommées aminopyridine, qui augmentent l'amplitude des contractions musculaires, restituent déjà partiellement la contractilité, mais elles ont des effets secondaires notables. Des expériences préliminaires faites chez l'animal avec E6A ont effectivement eu l'effet escompté. La molécule extraite de *Conus ermineus* améliorerait peut-être aussi la propagation de l'influx nerveux chez les personnes atteintes de sclérose en plaques.

Seule molécule spécifique des canaux sodium présynaptiques, E6A est aussi un outil précieux pour les neurobiologistes : Hung Lam Thien, du Département d'ingénierie et d'étude des protéines du CEA, à Saclay, a synthétisé une molécule identique et l'a marquée par un dérivé fluorescent : on verra ainsi où elle se fixe, c'est-à-dire que l'on pourra localiser les canaux sodium présynaptiques.

Marie-Thérèse LANDOUSY



Quand un signal arrive à la terminaison synaptique, des canaux sodium présynaptiques s'ouvrent ; des ions sodium entrent ce qui entraîne l'ouverture de canaux calcium et l'entrée d'ions calcium. Il s'ensuit une libération d'acétylcholine dans la fente synaptique. Lorsque le neurotransmetteur se fixe sur ses récepteurs, des canaux sodium postsynaptiques s'ouvrent et l'entrée d'ions sodium dans la fibre musculaire déclenche un signal de contraction.

La lumière lente

Ralentissement de la lumière à travers un nuage d'atomes très froids.

En 1840, le physicien français Léon Foucault montre que la vitesse de la lumière est plus faible dans l'eau que dans l'air : dans un matériau, la lumière se propage d'autant plus lentement que l'indice de réfraction est élevé. En fait, cette analyse est inexacte, car les particules de lumière, les photons, ne peuvent être ralentis : ils ne peuvent être qu'absorbés. Dans un diélectrique comme l'eau et le verre, une succession d'absorptions et d'émissions font que la lumière semble se déplacer plus lentement ; la lumière y est ralentie d'un facteur compris entre 1,5 et 2 par rapport à sa vitesse dans le vide, 300 000 kilomètres par seconde. Quand les indices de réfraction sont plus élevés, l'absorption est trop importante et la lumière ne se propage plus.

Aussi, la surprise fut grande lorsque une équipe de physiciens américains a annoncé le ralentissement d'un faisceau de lumière jusqu'à 17 mètres par seconde, la vitesse d'un cycliste en descente ! Pour cette prouesse, les physiciens ont utilisé la propagation étrange de la lumière à travers un paquet d'atomes ultrafroids irradiés par un champ électromagnétique intense.

Lorsqu'un gaz d'atome est soumis à un champ électromagnétique, les propriétés de ce système d'atomes sont modifiées. Dans ce système d'atomes « habillés » par la lumière, la lumière n'interagit pas directement avec les atomes, mais avec

le système constitué des atomes et du champ électromagnétique. En préparant convenablement un tel système, l'on crée une transparence électromagnétique, due à des interférences entre les niveaux d'énergie du système.

Les physiciens ont utilisé un nuage d'atomes de sodium qu'ils ont refroidis à la température de la transition de Bose-Einstein, à 135 nanokelvins. À cette température, le nuage est particulièrement dense, et plus le nuage est dense, plus la lumière est ralentie. Dans ces atomes ultrafroids, un champ laser de faible puissance engendre des interférences quantiques qui augmentent la transparence du nuage. En même temps que la transparence croît, l'indice de réfraction augmente beaucoup, d'où la faible vitesse de propagation de la lumière à l'intérieur du nuage.

Pour mesurer cette vitesse de propagation, les physiciens ont éclairé le nuage d'atomes habillés par une impulsion laser de 2,5 microsecondes. Sept microsecondes plus tard, l'impulsion avait franchi les 0,2 millimètre du nuage d'atome. La vitesse obtenue est égale à un dix millionième de la vitesse de la lumière : c'est la plus faible jamais mesurée.

Les photons qui pénètrent dans le nuage sont constamment absorbés et réémis, mais ils sont toujours réémis dans la même direction : aucun photon n'est perdu en étant réémis dans une direction aléatoire. Pourquoi ? Parce que la probabilité pour qu'un photon absorbé soit réémis dans une direction aléatoire est due à deux effets opposés qui, pour une fréquence de l'impulsion laser et une puissance du laser qui « habille » le nuage donnés, se compensent exactement. Au total, la lumière incidente semble parfaitement transmise, mais plus lentement. On pourrait utiliser un tel ralentissement en commutation optoélectronique.

BRÈVES

Entre deux grossesses

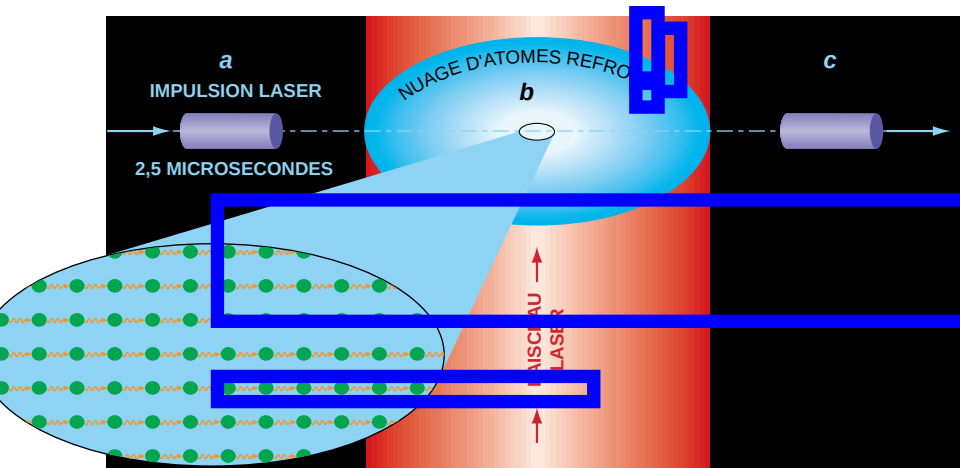
Quel est l'intervalle optimal entre deux grossesses ? Dans les pays en développement, c'est environ trois ans, moins dans les pays industrialisés. Des épidémiologistes américains, qui ont analysé les certificats de naissance de plus de 17 000 enfants nés entre 1989 et 1995 ont montré que les risques de naissance prématurée ainsi que de taille et de poids insuffisants à la naissance sont plus fréquents chez les enfants conçus moins de six mois après la naissance d'un premier enfant, comparés aux mêmes risques encourus par les enfants conçus un vingtaine de mois après le premier. Les risques sont également élevés quand l'intervalle entre deux naissances est supérieur à 10 ans. Dans ce cas les raisons sont multiples, l'une pouvant être une faible fécondité de la mère associée à des risques élevés de naissance prématurée.

Faill cachée

Les habitants de Los Angeles, en Californie, ont de nouveaux motifs d'inquiétude : une faille de 40 kilomètres de long, invisible de la surface, passe à quelques kilomètres sous leurs pieds. J. Shaw, de l'Université Harvard, et P. Shearer, de l'Université de Californie, l'ont cartographiée en exploitant les d'informations fournies par des compagnies pétrolières qui prospectent le sous-sol. En 1987, un séisme de magnitude six a été provoqué par la rupture d'une petite partie de cette faille. Si toute la faille rompait d'un coup, ce qui se produit tous les 500 à 2 000 ans, le séisme serait dix fois plus violent.

La mesure du génocide

Combien de personnes sont-elles mortes du fait du régime Khmer rouge, entre 1975 et 1979 ? Les démographes ont proposé différents chiffres, de 700 000 à trois millions, en se fondant sur des entretiens avec les survivants et en comparant l'évolution de la population avec une projection de l'évolution normale. P. Heuveline, du Centre de recherche sur la population de Chicago, a affiné les estimations : le chiffre le plus probable est compris entre 1,5 et 2,5 millions de décès (pour une population de sept à huit millions de personnes).



Une impulsion laser dont la durée est égale à 2,5 microsecondes (a) est émise vers un nuage d'atomes refroidis placés dans un piège magnétique (b). Un champ laser (en rouge) oriente les émissions de photons par les atomes dans la même direction et l'impulsion traverse le nuage d'atomes de 0,02 millimètre de long en 7 microsecondes (c), soit une vitesse de 60 kilomètres par heure.

Infarctus et infections

Le stress, l'hypertension, le tabac, l'obésité prédisposent aux accidents vasculaires cérébraux. Une nouvelle menace s'ajoute à la liste : les infections par la bactérie *Chlamydia*, un redoutable agent des maladies sexuellement transmissibles et la principale cause de stérilité chez les femmes. L'injection à des souris de certaines molécules spécifiques de la bactérie aboutit à l'obstruction des vaisseaux sanguins du cœur. Lors d'une infection par *Chlamydia*, le système immunitaire serait activé et des lymphocytes T dirigés contre une protéine du muscle cardiaque se multiplieraient : les infarctus seraient l'aboutissement de réactions auto-immunes déclenchées par la bactérie.

Une tombe congelée

Les Scythes vivaient dans les steppes du Nord de la mer Noire. Au VII^e siècle avant notre ère, ils franchirent le Caucase et l'une des troupes conquérantes s'aventura jusqu' dans les monts Altaï, au Kazakhstan. Les archéologues y ont trouvé une tombe vieille de 2 400 ans. Le complexe funéraire, situé à 1 200 mètres d'altitude, est recouvert d'un tumulus. L'eau après s'être infiltrée à travers la construction y a gelé et les restes sont parfaitement conservés. Henri-Paul Francfort (CNRS) et ses collègues y ont découvert des statues de bois doré, représentant des animaux et les cadavres de trois chevaux harnachés. Le tombeau du prince, situé à quelque quatre mètres sous la surface n'a pas encore été atteint.

Le blanchiment des coraux

Une algue vit en symbiose avec le corail, lui apportant les nutriments nécessaires à son développement et lui conférant sa couleur. Lorsque la température est trop élevée, l'algue est expulsée et le

squelette du corail en carbonate de calcium est mis à nu : le corail blanchit et finit par mourir. C'est quelquefois le cas dans les eaux de surface, à moins de deux mètres de profondeur. Hélas, le phénomène se répand

dans toutes les mers du Globe ; même à 30 mètres de profondeur, le corail blanchit, car l'algue a disparu, au grand dam des biologistes, qui ne savent expliquer le phénomène, et des plongeurs, qui craignent pour la beauté des fonds sous-marins.

Assurance biologique

La biodiversité garantit les écosystèmes contre les changements de l'environnement.

Pourquoi devrions-nous préserver la biodiversité ? On invoque souvent des aspects éthiques ou esthétiques, ou des conséquences économiques pour l'agriculture ou la médecine. Avec Shigeo Yachi, nous avons examiné l'intérêt écologique de la biodiversité : elle agit comme une assurance vis-à-vis des changements de l'environnement, en stabilisant le fonctionnement des écosystèmes.

Les écosystèmes, par leur activité naturelle, fournissent indirectement, et gratuitement, des « services » aux sociétés humaines : maintien de la fertilité des sols, réduction des pertes d'éléments minéraux par lessivage, contrôle du cycle de l'eau, régulation du climat. La valeur de ces services est difficile à quantifier, mais elle semble considérable. Des écosystèmes appauvris continueraient-ils à les fournir ?

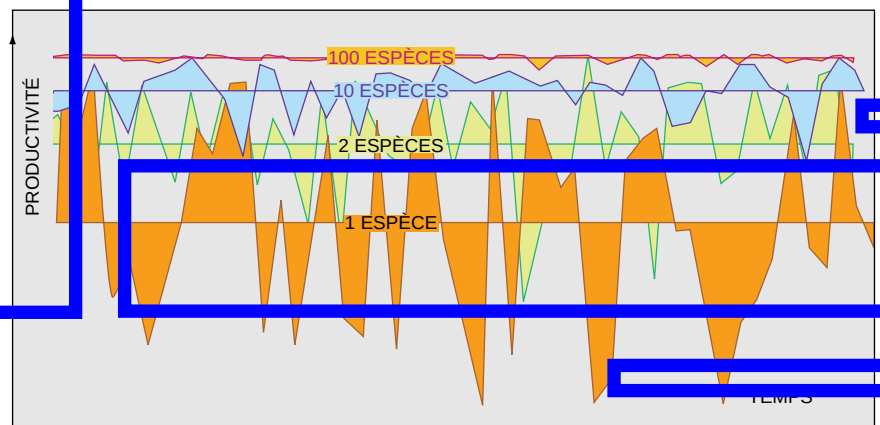
Si, semblaient montrer quelques expériences récentes de grande envergure, réalisées sur des communautés végétales herbacées. L'association d'un nombre modéré d'espèces, dont chacune remplit des fonctions bien différentes, suffit à déterminer l'intensité instantanée des grands processus fonctionnels d'un écosystème, tels que la production totale de tissus végétaux par photosynthèse ou la rétention des nutriments qui seraient, sinon, éliminés du sol par lessivage. Ces résultats étaient

soutenus par des modèles, selon lesquels la diversité des systèmes écologiques devait plutôt déstabiliser ceux-ci, chaque nouvelle interaction entre espèces étant une source potentielle d'instabilité. La biodiversité ne semble donc pas importante de ce point de vue, bien au contraire.

Toutefois, ces modèles reposent sur l'analyse de la stabilité de systèmes dynamiques déterministes à l'équilibre, qui ignorent la variabilité propre de l'environnement. Ils n'apportent aucune information sur la pérennité des écosystèmes à long terme, à l'échelle des changements de l'environnement. En outre, d'autres expériences récentes, réalisées sur des communautés de micro-organismes, montrent que la respiration totale de la communauté, par exemple, varie d'autant moins au cours du temps que la diversité des espèces est grande.

Nous avons donc élaboré un modèle dynamique probabiliste, qui décrit les fluctuations d'abondance des espèces en réponse à des variations de l'environnement. Ce modèle indique que l'intensité moyenne des processus fonctionnels d'un écosystème augmente avec le nombre d'espèces, même si celles-ci remplissent des fonctions semblables et que cette intensité est aussi plus stable au cours du temps. L'augmentation de l'intensité moyenne est due à la dominance des espèces les mieux adaptées dans chaque condition environnementale. La plus grande stabilité provient du décalage temporel des fluctuations d'abondance des différentes espèces, qui se compensent mutuellement d'autant mieux que le nombre d'espèces est grand.

Michel LOREAU,
Laboratoire d'écologie, ENS, Paris



Lorsque les conditions environnementales varient au cours du temps, l'amplitude des fluctuations de la productivité d'un écosystème est d'autant plus faible que le nombre d'espèces est grand : les variations de la productivité des différentes espèces se compensent d'autant mieux. En outre, la productivité moyenne (lignes horizontales) augmente avec le nombre d'espèces : les chances qu'il y ait toujours une espèce bien adaptée à l'environnement augmentent.

Phèdre : les secrets de l'interprétation

Les interprètes de Racine jouent sur le débit, l'intensité ou la métrique de la phrase pour susciter l'émotion.

Oui, Prince, je languis, je brûle pour Thésée.
Je l'aime non point tel que l'ont vu les enfers,
Volage adorateur de mille objets divers,
Qui va du Dieu des morts déshonorer la couche ;
Mais fidèle, mais fier, et même un peu farouche...
(Phèdre, Acte II, scène V)

À la création de Phèdre, en 1677, c'est Jean Racine, lui-même, qui dirigea l'actrice, La Champmeslé. Selon le fils de l'auteur, Racine «avait formé la Champmeslé, mais avec beaucoup de peine. Il lui faisait d'abord comprendre les vers qu'elle avait à dire, lui montrait les gestes et lui dictait les tons, que même notait». Dans le passage étudié, la mort de Thésée, roi d'Athènes, vient d'être annoncée. Phèdre, sa femme, aime en secret Hippolyte, le fils du premier mariage de Thésée avec Antiope, et lui avoue son amour. L'étude des enregistrements de cinq actrices ayant interprété Phèdre, a montré que chacune d'elles privilégie un paramètre acoustique particulier : la fréquence (variations mélodiques), l'intensité (modulations d'amplitude) ou la durée (fluctuations de débit).

Afin d'étudier les modes d'expressivité vocale, nous avons fait une analyse acoustique (grâce au logiciel *Mes-signaux*, mis au point par Robert Espesser) des premiers alexandrins de la déclaration de

Phèdre (Acte II, scène V) par cinq tragédiennes : Sarah Bernhardt (1911), Marie Bell (1935), Silvia Monfort (1973), Nada Strancar (1975) et Natacha Amal (1991).

Contrairement aux autres tragédiennes, Sarah Bernhardt n'avait pas de notes en scène et suivait ses propres directives. Edmond Rostand décrit l'énergie étonnante que la tragédienne déployait lorsqu'elle dirigeait ses partenaires : «elle indique des gestes, des intonations, se dresse, veut qu'on reprenne le rugit de rage, se rassied, sourit, boit du thé, commence à répéter elle-même». Comme Sarah Bernhardt, Marie Bell et Silvia Monfort ont joué Phèdre tout au long de leur vie, mais elles ont été dirigées par plusieurs metteurs en scène. Toutefois, d'après les documents d'archives, leur forte personnalité de directrices de théâtre et de grandes tragédiennes semble l'avoir emporté sur les directives de jeu.

Comment se manifeste la personnalité des interprètes de Phèdre ? On constate une grande liberté d'interprétation, malgré les contraintes de la versification. Marie Bell privilégie les variations mélodiques (plus d'une octave sur les vers analysés), Silvia Monfort les fluctuations de débit (de 1 à 1,8 syllabes par seconde, pauses internes incluses) et Nada Strancar l'intensité (les modulations d'amplitude, quand elle passe de la voix chuchotée à la voix projetée, sont de l'ordre de 54 décibels). Sarah Bernhardt et Natacha Amal jouent indifféremment de ces trois paramètres, mais tendent à utiliser davantage les variations mélodiques.

Silvia Monfort fait un usage important des pauses : les silences (48 pour cent de la durée totale du passage) y

sont presque aussi longs que le texte. Marie Bell, Nada Strancar et Natacha Amal privilégient la parole (les pauses représentent 22 pour cent seulement du temps total d'énonciation), tandis que Sarah Bernhardt les utilise peu (10 pour cent). Cela s'expliquerait par la performance vocale recherchée à la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e : il était important qu'un acteur puisse déclamer plusieurs vers sans reprendre son souffle.

Dans le passage étudié, les fluctuations vocales et stylistiques sont nombreuses. La déclamation parlée-chantée de Sarah Bernhardt contraste avec la voix chuchotée de Silvia Monfort et avec le ton emphatique de Marie Bell. L'emballement rythmique de Nada Strancar s'oppose à l'intonation légère de Natacha Amal. À l'inverse du chanteur qui recherche une homogénéité vocale, l'acteur doit déplacer sa voix, c'est-à-dire changer de timbre en fonction de l'état émotionnel du personnage.

L'évolution de la mise en scène a permis de déshabiller le texte racinien. Ainsi, Antoine Vitez (1975), en se livrant au déchiffrement vocal du texte avec ses acteurs et le musicien Georges Aperghis, s'est sans doute rapproché du travail de notation de Racine. La déclamation romanesque dont Molière se moquait déjà

a été progressivement rejetée par les traités de diction, car l'esthétique vocale repousse toujours les codifications anciennes et tente, à chaque époque, d'être plus naturelle. Pourtant, la voix de l'acteur reste toujours inscrite dans un jeu de stylisation et de théâtralisation.

Béatrice ALBERT, Nicole SCOTTO DI CARLO
Laboratoire Parole et Langage, CNRS ESA 6057



Pour renforcer l'ambiguïté de la déclaration du premier alexandrin étudié (l'aveu de Phèdre s'adresse-t-il à Thésée ou à Hippolyte ?), Marie Bell (à gauche) amplifie les pauses : «Oui, Prince, je languis (395 millisecondes), je brûle (1006 ms) pour (282 ms) Thésée (783 ms)». Du deuxième au cinquième vers, Silvia Monfort (au centre) joue sur les contrastes d'intensité et de débit : «Non point tel que l'ont

vu les enfers, / Volage adorateur de mille objets divers, / Qui va du Dieu des morts déshonorer la couche» (on a symbolisé l'augmentation de l'intensité en agrandissant la taille des caractères et l'accélération du débit en diminuant l'espace qui les sépare). Sarah Bernhardt (à droite) utilise indifféremment les variations d'intensité et de débit.

Le plus grand nombre entier

Les mathématiciens de l'Université de Nancago ont enfin trouvé le plus grand nombre entier : à la surprise générale, c'est le nombre 1. En effet, remarquons, tous les carrés d'un nombre sont supérieurs à ce nombre, sauf le carré de 1 qui est égal à 1. Ainsi puisqu'il existe un plus grand nombre entier, c'est 1, remarquablement petit. CQFD.

Repos néandertalien

Les Néandertaliens, qui ont peuplé l'Europe il y a entre 200 000 et 30 000 ans, avaient semble-t-il découvert conjointement l'art du nouage et de la sieste. L'archéologue Michel Cartoni a découvert en Corse des empreintes de filets, fossilisées dans de l'argile. Des trous de poteaux, dont la hauteur a été évaluée à 1,50 mètre, espacés d'environ deux mètres ayant été repérés sur le site, on pense à des sortes de hamacs.

Où a eu lieu le Big Bang?

Tous les objets célestes s'éloignent les uns des autres à une vitesse proportionnelle à leurs distances respectives. Ainsi va l'expansion de l'Univers. Connaissant les vitesses actuelles des étoiles et galaxies les astrophysiciens de l'Université de l'énergie cosmique ont eu la bonne idée de repasser le film à l'envers et de déterminer où était l'Univers au moment du Big Bang. Et bien, l'Univers a été créé exactement à l'endroit où se trouvaient les astronomes calculateurs. Quelle chance. N'importe quel scientifique, quel que soit le laboratoire qu'il occupe, est au centre du monde. Mais n'en était-il pas déjà persuadé?

La bande à Möbius

L'édition des œuvres de Möbius a permis de découvrir une tranche de vie topologique. Le chien de Pavlov, raconte Möbius, courait sur le côté de la bande de papier translucide qui constituait son Univers, sans pouvoir passer de l'autre côté, où vivait le chat de Schrodinger, à la fois mort de peur et fou d'intérêt (état intermédiaire dont il était familier). Le mathématicien Möbius se saisit de la bande, la coupa, la tordit d'un demi tour, et réunit les deux bords. La bande n'avait alors plus qu'un côté et les deux animaux partageaient le même univers. Hélas, le chien et le chat ne s'entendirent pas. Möbius, agacé par leurs querelles, réédita l'opération de coupe et de torsion, et fit disparaître l'unique côté subsistant, de même que les animaux querelleurs

Mayonnaise sans effort

L'éclatement de vésicules produit des émulsions.

La mayonnaise ne s'obtient qu'au prix d'un mélange vigoureux : l'énergie mécanique apportée sert à diviser le filet d'huile en gouttelettes qui sont alors dispersées dans l'eau du jaune d'œuf et du vinaigre. D'autres émulsions sont spontanées et se forment sans apport d'énergie. Nous avons analysé un mécanisme qui conduit à de telles émulsions.

Dans la mayonnaise, une stabilité relative est apportée par les molécules tensioactives du jaune d'œuf, qui viennent tapisser la surface des gouttelettes d'huile : ces molécules ont une extrémité (tête hydrophile) qui se dissout dans l'eau, tandis que l'autre (chaîne hydrophobe) ne s'y dissout pas. De ce fait, elles facilitent le contact entre l'eau et l'huile. Certains tensioactifs diminuent la tension de surface entre l'eau et l'huile (qui détermine l'énergie nécessaire à leur mise en contact) d'un facteur 10 000.

Nous avons étudié l'émulsification spontanée dans un système où la tension de surface peut être réduite de façon continue jusqu'à des valeurs extrêmement faibles. Ce système est constitué d'un mélange d'eau salée et d'une molécule tensioactive nommée AOT, qui contient une tête hydrophile et deux chaînes hydrophobes. Lorsque l'AOT est ajoutée à la solution d'eau salée, il s'y dissout et les molécules d'AOT restent dispersées tant que la concentration est inférieure à une concentration critique. Au-delà de cette concentration, si l'on ajoute encore des molécules d'AOT, celles-ci se regroupent en vésicules de diamètre de l'ordre de 20 micromètres ; les parois de ces vésicules sont alors des doubles couches de molécules d'AOT.

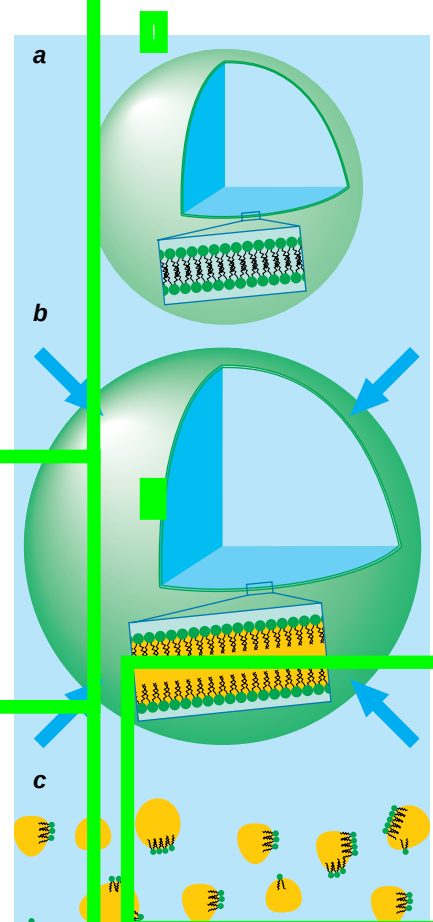
Après avoir obtenu une solution qui contenait beaucoup de vésicules, nous introduisons une gouttelette d'huile à l'aide d'une micropipette. Lorsqu'une vésicule entre en contact de l'huile, la bicouche se désorganise et un pore s'ouvre laissant entrer l'huile. Cette dernière pénètre dans la paroi de la vésicule, entre deux couches de chaînes hydrophobes.

En raison de la préférence des chaînes hydrophobes pour l'huile, la concentration de molécules d'AOT isolées en solution décroît en présence d'huile. Ainsi, dans le voisinage de la goutte d'huile injectée, la concentration d'agrégation critique en AOT est inférieure à ce qu'elle est dans la vésicule, où l'huile ne pénètre pas.

Comme les systèmes physiques évoluent de sorte que les concentrations en diverses molécules soient égales partout, l'eau diffuse spontanément ; et comme les molécules d'AOT sont immobilisées dans les parois, les molécules d'eau pénètrent dans les vésicules. Les vésicules gonflent et finissent par éclater comme des bulles de savon dispersant l'huile de leurs membranes dans la solution aqueuse sous la forme de petites gouttelettes : l'émulsion est formée.

Ainsi, l'émulsification spontanée disperse des microgouttelettes d'huile dans la solution, ce qui fait décroître la concentration d'agrégation critique loin de la gouttelette initiale : d'autres vésicules éclatent et l'émulsification se propage dans toute la solution.

Nous avons utilisé différents types d'huiles. Avec des huiles dont les chaînes sont courtes (comme l'octane, C_8H_{18}), l'émulsification se produit très rapide-



Dans une solution d'eau salée, l'addition de molécules tensioactives conduit, au-delà d'une certaine concentration, à la formation de vésicules dont les parois sont des bicouches d'AOT (a). Lorsque l'on ajoute de l'huile à la solution, elle s'incorpore à la bicouche des vésicules (b). Les vésicules se remplissent alors d'eau, car la concentration en AOT à l'intérieur est supérieure à la concentration à l'extérieur. Finalement, la vésicule éclate et pulvérise l'huile dans la solution (c).

ment, alors qu'avec des huiles aux chaînes longues (comme le dodécane $C_{12}H_{26}$), elle est très lente. Pourquoi ces différences ? Parce que les chaînes courtes, contrairement aux chaînes longues, sont très semblables aux chaînes hydrophobes des molécules tensioactives. Elles sont en conséquence de très bon solvants pour les chaînes hydrophobes du tensioactif.

Ce mécanisme d'émulsification spontanée fait intervenir l'architecture moléculaire des tensioactifs : les vésicules sont

composées de molécules ayant deux chaînes hydrophobes, mais nous étudions aujourd'hui des solutions avec des molécules tensioactives à une seule chaîne hydrophobe.

Dans l'industrie apparaissent des «concentrés auto-émulsionnables» où le mélange est inutile. La compréhension des mécanismes d'émulsification spontanée aide à-t-elle à les améliorer ?

Noushine SHAHIDZADEH

Laboratoire de physique statistique, École normale supérieure, Paris.

Les voies de l'hydrogène

Elles ne sont plus impénétrables : dans les molécules qui assurent ses transformations chimiques, l'hydrogène emprunte un réseau de canaux.

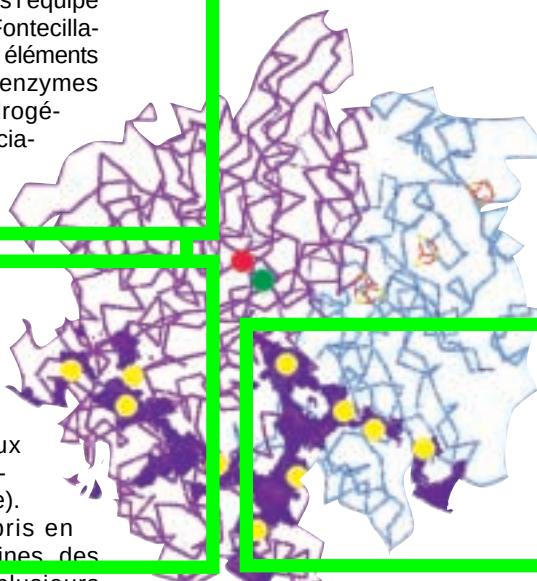
Dans les organismes vivants, les mécanismes de transport restent encore partiellement mystérieux : comment les molécules passent-elles d'une cellule à l'autre ou, au sein d'une même cellule, d'un compartiment à l'autre, du milieu cellulaire à l'intérieur du noyau ? Comment un gaz parvient-il à diffuser de la surface d'une protéine jusqu'à son cœur, où siègent des réactions chimiques ? Dans l'équipe CEA-CNRS UPR 9015 de Juan Fontecilla-Camps, nous avons obtenu des éléments de réponse en étudiant des enzymes bactériennes, nommées hydrogénases, qui catalysent la dissociation de la molécule gazeuse d'hydrogène en deux protons et deux électrons, ou bien, au contraire, la production d'hydrogène à partir de protons et d'électrons : le gaz ne diffuse pas au hasard dans la molécule, mais suit des chemins bien précis (chez certaines bactéries qui vivent dans des milieux dépourvus d'oxygène, l'hydrogène est une source d'énergie).

Les gaz sont souvent pris en charge par des métalloprotéines, des protéines contenant un ou plusieurs atomes métalliques. Certaines catalysent des réactions où interviennent ces gaz, par exemple, la réduction de l'oxygène en eau ou de l'azote de l'air en ammoniac. Dans tous les cas, les réactions ont lieu dans une région particulière de l'enzyme, son site actif : c'est là que le gaz se fixe pendant le transport ou qu'il est transformé. Pour

étudier la façon dont les gaz diffusent dans les protéines, nous avons analysé des cristaux d'une hydrogénase, au moyen du faisceau de rayons X du synchrotron de Grenoble.

Jusqu'à présent, on admettait que, dans les protéines, les atomes bougent suffisamment autour de leur position d'équilibre pour que les gaz puissent se faufiler jusqu'au site actif ou s'en échapper, surtout dans le cas de l'hydrogène, de très petite taille. Or, l'analyse détaillée de la structure tridimensionnelle d'une hydrogénase obtenue par diffraction des rayons X a révélé l'existence d'un réseau de canaux reliant la surface de la protéine au site actif enfoui au cœur de la molécule.

Ces canaux forment un réseau interconnecté et ont un caractère hydrophobe



l'hydrogène pénètre dans la molécule d'hydrogénase par des canaux (en violet) où sont répartis plusieurs sites de fixation du gaz (les sphères jaunes). La protéine a été représentée par sa chaîne d'acides aminés (une des deux sous-unités est en bleu, l'autre en violet). Les deux sphères centrales indiquent la position du site actif, où sont présents un atome de nickel (en vert), et un atome de fer (en rouge).

(sans affinité pour l'eau), ce qui en fait des passages possibles pour les gaz. Afin de tester cette hypothèse, nous avons fait diffuser des gaz dans des cristaux d'hydrogénase, et observé leur trajet. L'idéal aurait été de faire diffuser de l'hydrogène, puisqu'on sait qu'il interagit avec la protéine. Toutefois, ce gaz n'a pas assez d'électrons pour être détecté aisément par la méthode utilisée, la cristallographie par rayons X. Nous avons donc choisi un gaz inerte plus lourd, contenant plus d'électrons, le xénon. Bien qu'il soit plus gros (deux fois plus gros en moyenne) le xénon est, comme l'hydrogène, un gaz hydrophobe.

Ainsi, lorsque les cristaux d'hydrogénase sont placés sous pression de xénon, on observe que des atomes de xénon pénètrent dans la protéine, très compacte, et s'y fixent le long des canaux hydrophobes déjà observés. Cette expérience prouve que ces canaux sont empruntés par les gaz, ici le xénon. Nous avons, en collaboration avec Patricia Amara et Martin Field, complété ces expériences par des simulations de dynamique moléculaire.

D'après les données structurales de l'hydrogénase, nous avons simulé la diffusion de l'hydrogène dans la protéine : les molécules virtuelles d'hydrogène ne diffusent jamais au hasard dans la protéine, mais, pour circuler, pour atteindre le site actif et éventuellement ressortir de l'enzyme, elles empruntent uniquement les canaux mis en évidence par cristallographie.

Ces canaux, présents dans toutes les molécules de la famille des hydrogénases, jouent certainement un rôle important dans le métabolisme de l'hydrogène. Les gaz seraient acheminés de l'extérieur de l'hydrogénase jusqu'au site actif (ou inversement) grâce à ces canaux, mais aussi, vraisemblablement, grâce aux fluctuations des atomes dans la protéine. Ces canaux, lien discret, mais efficace, entre la surface et le site actif, faciliteraient l'accès des gaz jusqu'au cœur de la molécule, et amélioreraient l'efficacité de l'enzyme. Afin de confirmer que ces canaux sont bien le passage obligé de l'hydrogène vers le site actif, l'équipe de Grenoble va tenter de bloquer le canal à l'entrée du site actif par mutation de certains acides aminés : l'activité de l'enzyme devrait alors être notablement réduite. De futures études diront si de tels canaux sillonnent aussi les autres enzymes qui métabolisent des gaz.

Yael MONTET-BERTHEAS
Institut de biologie structurale – Grenoble

Propriétés émergentes

L'interaction de plusieurs chaînes biochimiques a des propriétés imprévisibles.

Pendant la digestion, l'amidon du pain est transformé par des enzymes en maltose, puis en glucose qui pénètre dans le sang pour être distribué aux différentes cellules. Il est alors peu à peu dégradé en énergie, en eau et en dioxyde de carbone par une cascade de réactions enzymatiques où le produit de l'une est le réactif de la suivante. Les voies de transmission d'un signal, de l'extérieur vers l'intérieur d'une cellule, sont aussi des cascades de réactions enzymatiques. Upinder Bhalla et Ravi Iyengar, de l'École du Mont Sinaï, à New York, ont montré qu'un ensemble de voies enzymatiques dépendant les unes des autres possède des propriétés qualifiées d'émergentes, c'est-à-dire qu'on ne peut en déduire des propriétés des voies isolées.

Une cascade de réactions prises isolément est sans surprise, c'est-à-dire qu'une molécule initiale – un signal – déclenche rapidement la production d'une molécule spécifique à l'autre extrémité. Cependant, dans une cellule, les voies enzymatiques sont rarement isolées et les produits intermédiaires de l'une sont parfois les réactifs d'une autre : l'ensemble représente un réseau métabolique. Les biochimistes ont modélisé

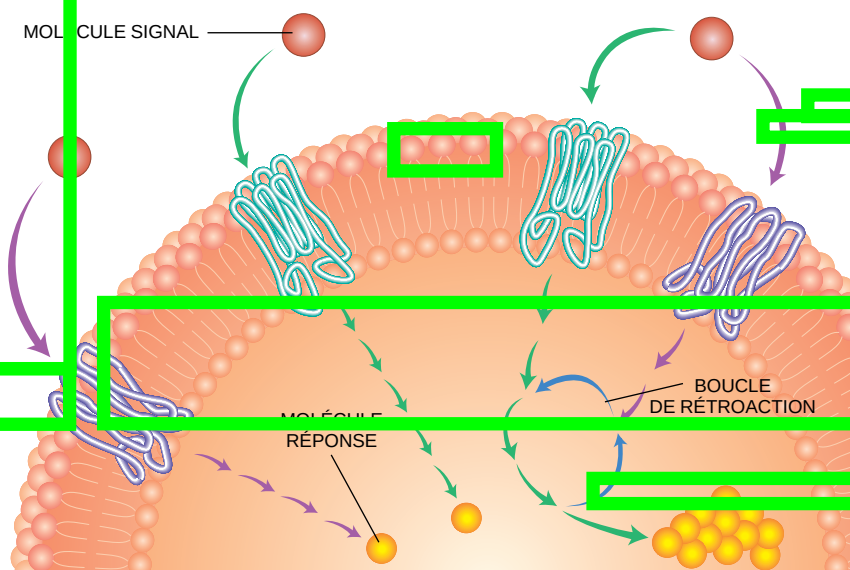
des chaînes de réactions enzymatiques isolées dont ils ont déterminé les paramètres tels que les vitesses de réaction ou les concentrations optimales de fonctionnement.

Puis, ils ont modélisé le comportement de deux voies métaboliques associées. Dès ce stade, des propriétés émergentes apparaissent. Après l'arrêt du stimulus déclenchant, les molécules finales continuent à être produites : un cycle métabolique stable, nommé boucle de rétroaction, s'installe et fonctionne en permanence en résistant aux petites fluctuations de concentration.

De plus, de cette association naît un seuil de stimulation qui régule la transmission de signaux : isolées, les chaînes fonctionnent à la moindre stimulation, tandis qu'associées elles ne réagissent qu'au-delà d'une certaine concentration de molécules.

L'étape suivante a consisté à simuler l'association de quatre voies métaboliques. Là encore, la réponse persiste à l'arrêt de la stimulation. Par ailleurs, les biochimistes ont montré que ce type de réseau adopte un cycle stable qui dépend de conditions initiales telles que la concentration en réactif.

Ces résultats montrent que l'étude de certains phénomènes biologiques requiert la prise en compte de différentes associations de chaînes enzymatiques, l'analyse de leurs propriétés non intuitives et une vision plus globale du métabolisme, car l'analyse des voies métaboliques simples est insuffisante. De même, à une échelle supérieure, l'étude d'un seul neurone est insuffisante à la compréhension de la conscience et de l'apprentissage.



La persistance du signal après l'arrêt de la stimulation est l'une des propriétés émergentes de l'association de plusieurs voies enzymatiques. Isolées, les chaînes de réactions verte et violette produisent une seule réponse (molécule orange) sous l'effet d'un stimulus (molécule rouge). Lorsqu'elles sont couplées, une boucle de rétroaction (en bleu) se crée et la production de molécules réponse continue, même après l'arrêt de la stimulation.

L'origine des insectes

Les insectes seraient des crustacés adaptés à la vie terrestre.

Les découvertes récentes de la biologie moléculaire, débattues au Muséum de Paris, remettent en cause les classifications des insectes et des autres arthropodes. Au milieu du ^{xx}e siècle, les anatomistes pensaient que les insectes devaient être réunis aux myriapodes, les « mille-pattes », dans un groupe d'arthropodes terrestres nommé « atélocérates ». Ils étaient apparus il y a environ 400 millions d'années. Les crustacés formaient un groupe encore plus ancien, apparu il y a environ 550 millions d'années et essentiellement aquatique, à l'exception des copépodes.

De nombreux caractères anatomiques séparaient les atélocérates des crustacés : les premiers avaient une seule paire d'antennes, des pattes simples, une « lèvres » sous la bouche, un système de trachées respiratoires qui irriguaient tous les tissus de l'organisme, des glandes digestives particulières. Les crustacés étaient bien différents avec leurs deux paires d'antennes, des pattes bifurquées munies d'une branchie, jamais de « lèvres », pas de trachées ni de glandes intestinales. Les biologistes faisaient remonter la séparation de ces deux lignées au tout début de l'ère primaire ou même juste avant.

A partir de 1990, des séquençages d'acides nucléiques (ADN et ARN) et des reconstitutions de l'histoire évolutive de ces molécules ont précisé la phylogénie du règne animal. Or, certains résultats montraient une nette parenté des insectes non pas avec les myriapodes, mais avec les crustacés. Il fallait revoir toute la question d'après les caractères anatomiques, autant que l'étude de l'ordre d'agencement de certains gènes sur l'ADN mitochondrial tendait aussi à réunir crustacés et insectes.

Et si les insectes n'étaient rien d'autre que des crustacés..., mais des crustacés adaptés à la vie terrestre ? Déjà évoquée au début du siècle, l'hypothèse resurgissait. Les caractères anatomiques communs aux myriapodes et aux insectes seraient désormais des convergences adaptatives qui seraient apparues à la sortie du milieu aquatique, et il devenait intéressant de dégager les caractères communs aux insectes et aux crustacés, en particulier certaines structures des yeux, du système nerveux, des mâchoires (mandibules), ou d'hypothétiques correspondances entre les lobes branchiaux des uns et les ailes des autres.

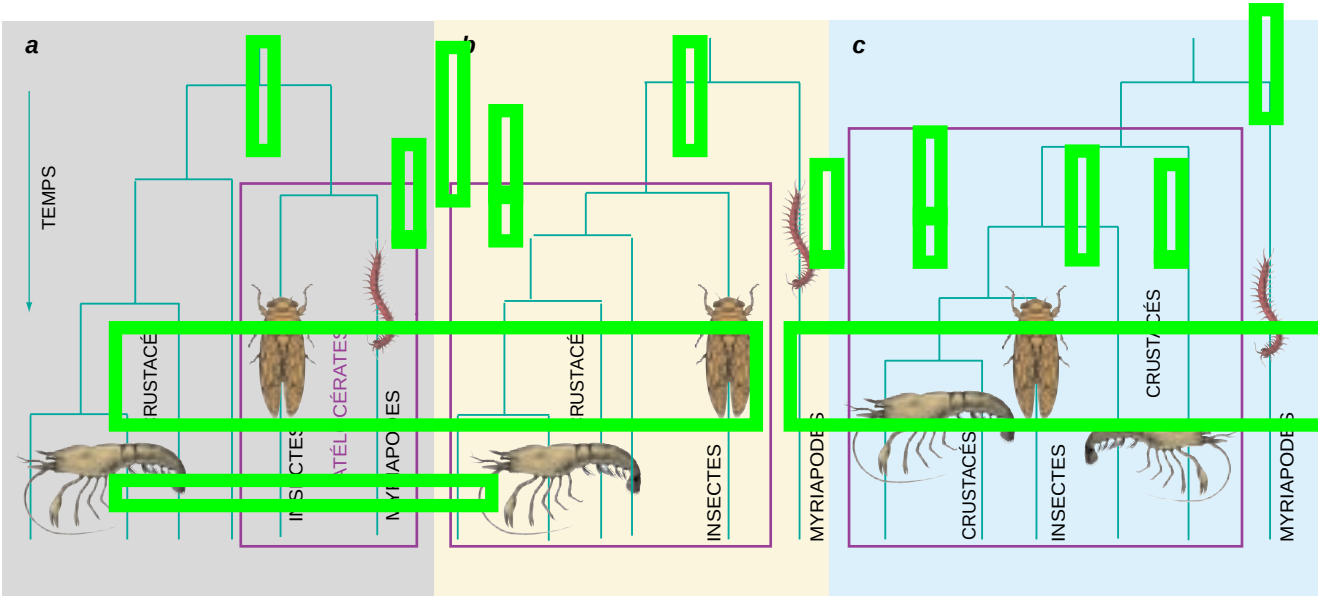
Une différence fondamentale distingue les myriapodes d'une part, les insectes et les crustacés de l'autre (à l'exception cependant des rémipèdes, extraordinaires petits crustacés des fonds marins découverts seulement en 1981). Les premiers ont un corps uniforme, un « tronc » dont les segments sont tous à peu près semblables ; les seconds ont en commun un corps qui peut se décomposer en « régions » spé-

cialisées, tels le thorax ou l'abdomen. Les récentes découvertes de la génétique du développement indiquent que des « gènes à homéoboîte » du système *Hox* (des gènes fondamentaux dans l'organisation de tous les animaux pluricellulaires) seraient responsables de ces spécialisations des différentes parties du corps.

Depuis ces découvertes, les zoologistes ont redoublé d'efforts pour revoir les données anatomiques, aidés par des interprétations nouvelles des caractères morphologiques et par des techniques modernes d'étude, telle la topographie des lieux d'expression de certains gènes du développement. L'examen minutieux des structures du squelette de ces arthropodes, du lieu d'insertion des pattes, de l'origine des ailes des insectes, de l'organisation du système nerveux, et des découvertes spectaculaires d'insectes fossiles vieux de plus de 300 millions d'années – avec non pas trois, mais treize paires de pattes ! –, ont renouvelé les discussions zoologiques.

Cependant le débat n'est pas clos, car de bons arguments demeurent pour réunir insectes et myriapodes. C'est un problème majeur : l'origine des insectes, c'est l'origine de plus de la moitié des espèces du monde vivant. Le premier insecte était-il un crustacé de l'ère primaire qui s'est adapté au milieu terrestre, puis a engendré les millions d'espèces passées et présentes qui ont envahi tous les continents avec le succès que l'on connaît ?

Thierry DEUVE
Laboratoire d'entomologie,
Muséum national d'histoire naturelle



Trois hypothèses proposées pour la phylogénie des insectes, des crustacés et des myriapodes. Soit les insectes sont plus proches parents (ils ont un ancêtre commun) des myriapodes que des crustacés (a). Soit les insectes sont plus proches parents des crus-

tacés que des myriapodes, mais ils n'appartiennent pas au groupe des crustacés actuels (b). Soit, enfin, les insectes sont une lignée parmi d'autres de crustacés, mais cette lignée est adaptée à la vie terrestre (c).

Mammographie numérique

Un nouveau dispositif pourrait détecter des microcalcifications, dans le sein, deux fois plus petites que les dispositifs classiques.

La lutte contre le cancer est souvent une question de temps : plus une tumeur est dépistée rapidement, plus les chances de guérison sont élevées. Une petite tumeur localisée est plus facile à éliminer, par exemple chirurgicalement, et présente peu de risques d'avoir déjà créé des métastases (des cellules cancéreuses ne se sont pas encore échappées de la tumeur primaire pour fonder de nouvelles colonies tumorales éloignées). Un nouveau dispositif de détection des petites tumeurs du sein devrait permettre aux radiologues de dépister des microcalcifications deux fois plus petites que celles que détectent les dispositifs disponibles aujourd'hui, et ceci avec une dose de rayonnement cinq fois plus faible que dans les mammographies classiques.

Lors d'une mammographie, un faisceau de rayons X traverse le sein. Certains photons sont arrêtés par le tissu mou et s'ils traversent une tumeur, ils sont davantage absorbés. Sur l'image, qui indique le nombre de photons arrivant sur l'émulsion photographique, on observe une zone dont la densité diffère. Cette méthode présente deux inconvénients : une proportion

2. Les plaques photographiques détectent moins de photons X (à gauche) que les détecteurs utilisés par l'équipe du LEPSI, de sorte que les contrastes sont meilleurs et que l'on détecte les détails bien plus petits avec la nouvelle méthode (à droite).

notable de photons traverse la plaque photographique sans interagir, donc sans laisser de traces, de sorte qu'on doit augmenter l'intensité du faisceau incident et exposer les femmes à des doses supérieures de rayons X. De surcroît, la numérisation de l'image est difficile du fait que l'on ne peut utiliser les procédés de traitement de l'image qui permettraient d'améliorer la qualité, ni transférer les données vers des spécialistes éloignés.

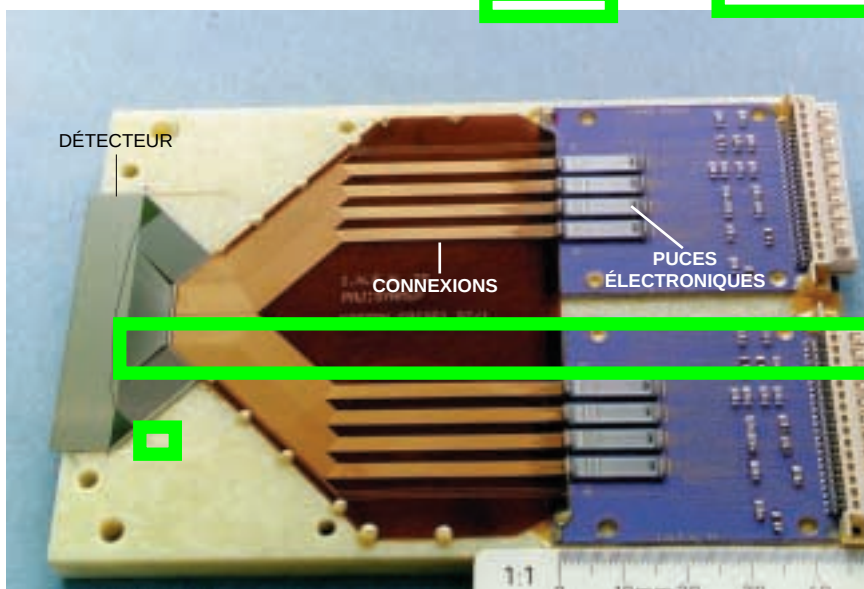
Pour pallier ces inconvénients l'équipe de Renato Turchetta, au Laboratoire électronique et de physique des systèmes instrumentaux (le LEPSI), à Strasbourg, a mis au point un dispositif fondé sur les détecteurs au silicium utilisés en physique des particules et sur une nouvelle électronique intégrée. Dans les détecteurs classiques, les photons traversent des sillons tracés dans une plaque de silicium. Dès qu'un photon est absorbé par cette dernière, il engendre une charge électrique

et un circuit électronique reconstruit une image à partir de ces signaux.

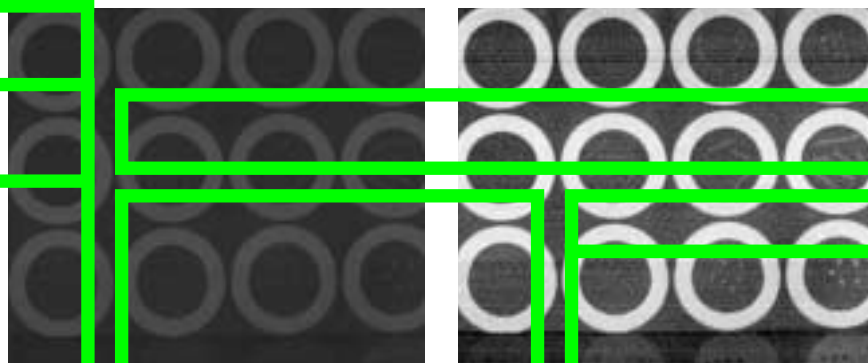
Dans le nouveau détecteur, les photons sont absorbés le long de pistes parallèles (voir la figure 1), et chaque piste définit un pixel sur l'image finale. Les pistes mesurent un centimètre de longueur, ce qui est suffisamment long pour que 90 pour cent des photons qui ont traversé les tissus analysés engendrent un signal. Pendant la formation de l'image, de nombreux photons sont absorbés par chaque piste, et il s'agit alors de compter les photons tout en éliminant les signaux parasites dus au bruit de fond. Les détecteurs comptent en parallèle les impulsions, c'est-à-dire le nombre de photons, et le dispositif électronique, adapté à ce flux de photons (beaucoup plus intense que lors de la détection de particules dans les expériences de physique) reconstruit l'image en niveaux de gris.

Les premiers résultats ont été obtenus avec la source de photons X monochromatiques produite par le synchrotron italien de Trieste. Des objets de référence ont été analysés et les résultats obtenus par cette méthode ont été comparés avec ceux d'une radiographie classique (voir la figure 2). Les contrastes sont améliorés, de sorte que des détails très fins apparaissent. On déduit des résultats obtenus que l'on pourrait réduire d'un facteur cinq l'intensité des rayons X nécessaire à une mammographie, et que l'on ferait apparaître des détails deux fois plus petits que ceux mis en évidence par la mammographie classique : on verrait des microcalcifications de 0,05 millimètre de diamètre (avec les mammographies actuelles on ne distingue pas de détails inférieurs à 0,1 millimètre).

Reste à valider la méthode non plus sur des objets, mais sur des patientes, et à trouver un industriel pour passer du prototype à un dispositif commercialisé qui s'adapterait sur les appareils utilisés aujourd'hui.



1. Le détecteur comporte des pistes (les sillons horizontaux) qui sont traversés par les photons incidents détectés par les puces électroniques qui suivent.



FORUM BIO

Etudiants / Entreprises
7 et 8 avril 1999

Espace Double (entrée gratuite)
sur le Campus de la Doua
à Villeurbanne

organisé par
la Fondation Marcel Mérieux
en collaboration avec
la Mairie de Lyon
l'Université de Lyon I

Les objectifs

- Aider les jeunes dans leur orientation professionnelle
- Initier une rencontre Étudiants / Entreprises
- Maîtriser les outils de la recherche d'emploi
- Permettre une rencontre entre les professionnels présents

Les conférences

- Les contrats de recherche Entreprises / Université
- La protection de l'innovation à l'échelle européenne
- Le marketing de la Recherche et du Développement
- Les aides à l'embauche des jeunes diplômés.

Nous contacter

Forum Bio
Bât. Astrée
43, bd. Du 11 novembre 1918
69622 VILLEURBANNE Cedex
Tél. : 04.72.43.26.34
Fax : 04.72.43.26.35
E.mail : forum.bio@iname.com

[http:// www.multimania.com/forumbio](http://www.multimania.com/forumbio)

Nouvelle espèce de rongeur arboricole

L'Isothrix
découvert dans les hauteurs
de la forêt guyanaise.

La forêt de Guyane est loin d'avoir révélé tous ses secrets. Les scientifiques qui étudient la faune et la flore de la canopée savent qu'ils découvriront de nouveaux trésors.

Le dernier exemple en date est un petit rongeur arboricole d'à peine 26 centimètres. Il a été déniché par Jean-Christophe Vié, docteur vétérinaire, ancien responsable d'un programme de sauvetage et de recherche mis en place aux abords du barrage de Petit-Saut, à une centaine de kilomètres de Cayenne.

J.-Ch. Vié a attrapé à la main deux rongeurs à quelques jours d'intervalle et dans un rayon de moins d'un kilomètre. Leurs caractéristiques physiques ne semblaient correspondre à aucune espèce répertoriée. Après une captivité d'un mois, les deux échimyidés, deux femelles, ont été envoyés au Muséum d'histoire naturelle de Paris pour examen.

Ce rongeur arboricole possède des caractéristiques particulières : dans les tons de roux et de brun, ses poils sont très doux, alors que l'ensemble des rongeurs de la forêt guyanaise répertoriés ont des poils drus. Il possède de petites taches noirâtres au coin des yeux. Enfin sa queue est plus longue que celle de son plus proche cousin, le pagurus, à moitié dénudée, et elle se termine par une petite touffe de poils, unique chez ce type d'animal.

Une zone de poils blancs est visible au niveau des parties génitales, les pattes sont larges avec des griffes fortes, les oreilles sont légèrement plus petites que celles des autres espèces et arrondies.

Les chercheurs ont d'abord pensé qu'il s'agissait d'une espèce déjà connue, l'*Isothrix pagurus*, présent à quelques centaines de kilomètres de là, au Brésil, et dans l'ensemble du bassin amazonien. Les naturalistes ont poussé leurs recherches plus avant : par séquençage de l'ADN mitochondrial, ils ont déterminé que l'animal est très proche du pagurus du Brésil, du Pérou et de la Bolivie, d'un point de vue morphologique et moléculaire. Mais il diffère de son cousin par le nombre de chromosomes et par un réaménagement chromosomique. Ces deux espèces, sont ainsi génétiquement isolées. L'*Isothrix* a 24 paires de chromosomes contre 11 chez le pagurus.

On connaissait déjà trois sortes d'*Isothrix* : le pitus, le pagurus et le bistrata, bien localisés. Désormais, le genre est composé de cette nouvelle espèce, baptisée *Isothrix sinnamariensis*, du nom de la commune guyanaise de Sinnamary, proche de celle où les deux échimyidés ont été capturés. La nouvelle n'a pas fait grand bruit, car l'*Isothrix sinnamariensis* n'est ni plus ni moins qu'une sorte de rat, peu populaire. Elle dénote que la forêt tropicale d'Amazonie est encore méconnue. Caractérisée par l'absence de lumière, cette forêt présente les variétés faunistiques et floristiques les plus riches du monde : les chercheurs ont déjà identifié près de 200 mammifères, dont une centaine de chauves-souris, une centaine de batraciens, 700 oiseaux, 430 espèces de poissons d'eau douce et quelque 1 500 espèces d'arbres. Il reste à faire.

Stéphane URBAJTE

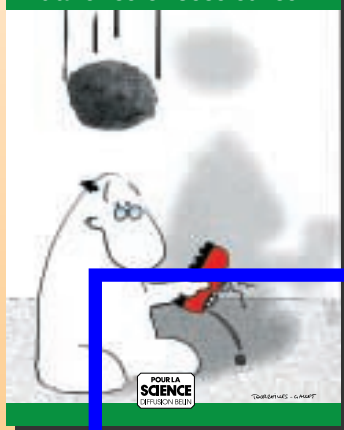


Isothrix sinnamariensis nouveau et sympathique rongeur de la forêt guyanaise.

DES CAILLOUX DANS LES CHOSSES SÛRES

DIDIER NORDON

**Des cailloux
dans les choses sûres**



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

144 pages - 70 F

Code 1897

**POUR LA
SCIENCE**
ÉDITION BELIN

Bon de commande en p. 98

Plantes trompeuses

Certaines plantes abusent les insectes pollinisateurs avec des fleurs sans nectar. On modélise l'apprentissage de l'insecte.

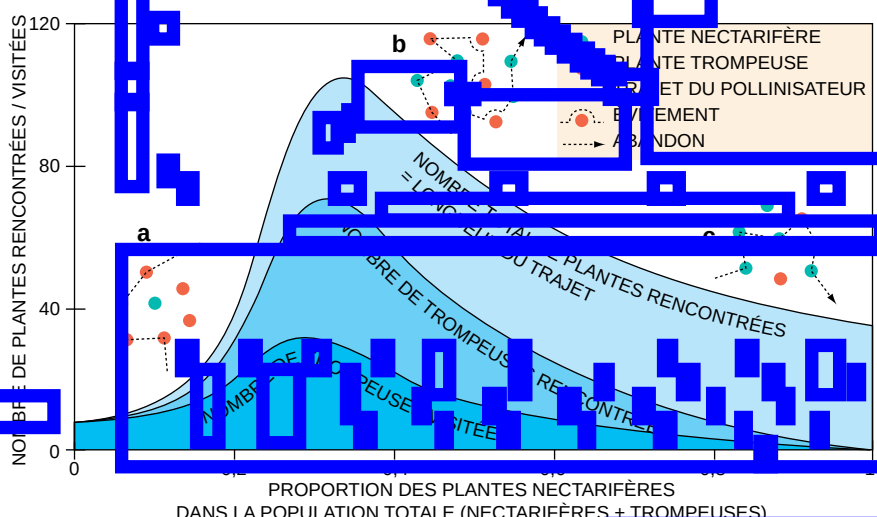
La relation entre insectes et plantes à fleurs semble un modèle de réciprocité. Les insectes qui viennent chercher leur nourriture dans les fleurs transportent, en passant de fleur en fleur, le pollen de la plante et assurent sa reproduction. Celle-ci récompense chaque visite par du nectar ou du pollen et signale la présence de cette récompense par une corolle et des parfums. Toutefois, le signal est parfois fallacieux : la plante produit une corolle attirante et des parfums comme les autres plantes, mais sans rien donner. Il y a pollinisation « par tromperie ».

Certaines plantes trompeuses profitent du voisinage d'une plante honnête en fournissant le même signal à l'insecte. Le pollinisateur confond alors les deux plantes et continue à visiter la malhonnête, simplement parce qu'il ne la distingue pas de l'honnête. Dans d'autres cas, la plante trompeuse se contente d'être attractive, sans ressembler à une plante honnête. Le pollinisateur peut alors apprendre à l'éviter, mais il ne se rend compte de la supercherie qu'après avoir visité quelques-unes de ses fleurs. La plante trompeuse assure ainsi sa reproduction en profitant de la « nouveauté » de ses

pollinisateurs et du temps qui leur est nécessaire pour la démasquer.

Afin de simuler sur ordinateur ce mécanisme de tromperie sans mimétisme, on a modélisé l'apprentissage des pollinisateurs. Initialement, ceux-ci n'ont pas d'expérience. Toutes leurs estimations des gains attendus de telle ou telle plante ne sont que des *a priori* : l'insecte suppose qu'une plante fournit d'autant plus de nectar qu'elle fait de grandes fleurs, ce qui est généralement le cas. Au fil des visites, le pollinisateur va associer à chaque plante la récompense qu'elle fournit réellement, et décider de visiter une plante s'il en attend autant ou plus que la moyenne des gains obtenus de chaque plante déjà visitée.

Le taux de pollinisation théorique des plantes trompeuses dépend dès lors de leur fréquence par rapport aux plantes nectarifères (leur densité). En effet, plus une plante trompeuse est fréquente, plus souvent le pollinisateur la rencontrera et donc plus facilement il apprendra à l'éviter. En outre, les pollinisateurs abandonneraient rapidement une population composée majoritairement de plantes trompeuses, car ils n'y trouveraient pas assez à manger. La plante trompeuse devrait donc être avantagée à faible fréquence. Toutefois, si l'on considère les visites de pollinisateurs comme une ressource limitée, alors la plante trompeuse entre en compétition avec les plantes nectarifères qui poussent à proximité. Un trop rare devient désavantageux. Ces deux mécanismes déterminent la dépendance non linéaire de l'appren-



1. La proportion des plantes nectarifères et des plantes trompeuses (sans nectar) dans une population détermine le comportement de l'insecte pollinisateur. Quand les trompeuses sont majoritaires (a), l'insecte, faute de point de comparaison, n'apprend pas à les éviter : il visite celles qu'il rencontre. Toutefois, il se décourage vite en raison du faible gain : le trajet moyen (n o m b e t o t a l d e p l a n t e s r e n c o n t r é e s) est court. Quand la fréquence des nectarifères augmente (b), l'insecte apprend à les éviter : le trajet moyen (n o m b r e d e p l a n t e s r e n c o n t r é e s) est long.



2. L'orchidée *Dactylorhiza praetermissa* est une plante trompeuse : ses fleurs n'offrent pas de nectar. Elles sont néanmoins visitées par un bourdon naïf.

sité, de sorte que le nombre de plantes trompeuses visitées est maximal à des densités intermédiaires (voir la figure 1).

En outre, si l'espèce trompeuse est variable morphologiquement, chaque variant est sélectionné selon sa fréquence au sein de la population totale de trompeuses : un variant rare, moins souvent rencontré par les pollinisateurs, est moins facilement évité et donc avantagé, de sorte qu'il ne disparaîtra pas. Cette sélection dépendante de la fréquence suffit à expliquer le maintien d'un polymorphisme de couleur chez de nombreuses orchidées trompeuses (chez *Dactylorhiza sambucina*, par exemple, dont les fleurs peuvent être rouges ou jaunes au sein d'une même population). L'existence de variants morphologiques ralentit en outre l'apprentissage des pollinisateurs par rapport à la situation où toutes les trompeuses sont identiques. Par conséquent, le taux moyen de pollinisation dans une population de trompeuses augmente avec le nombre de variants morphologiques.

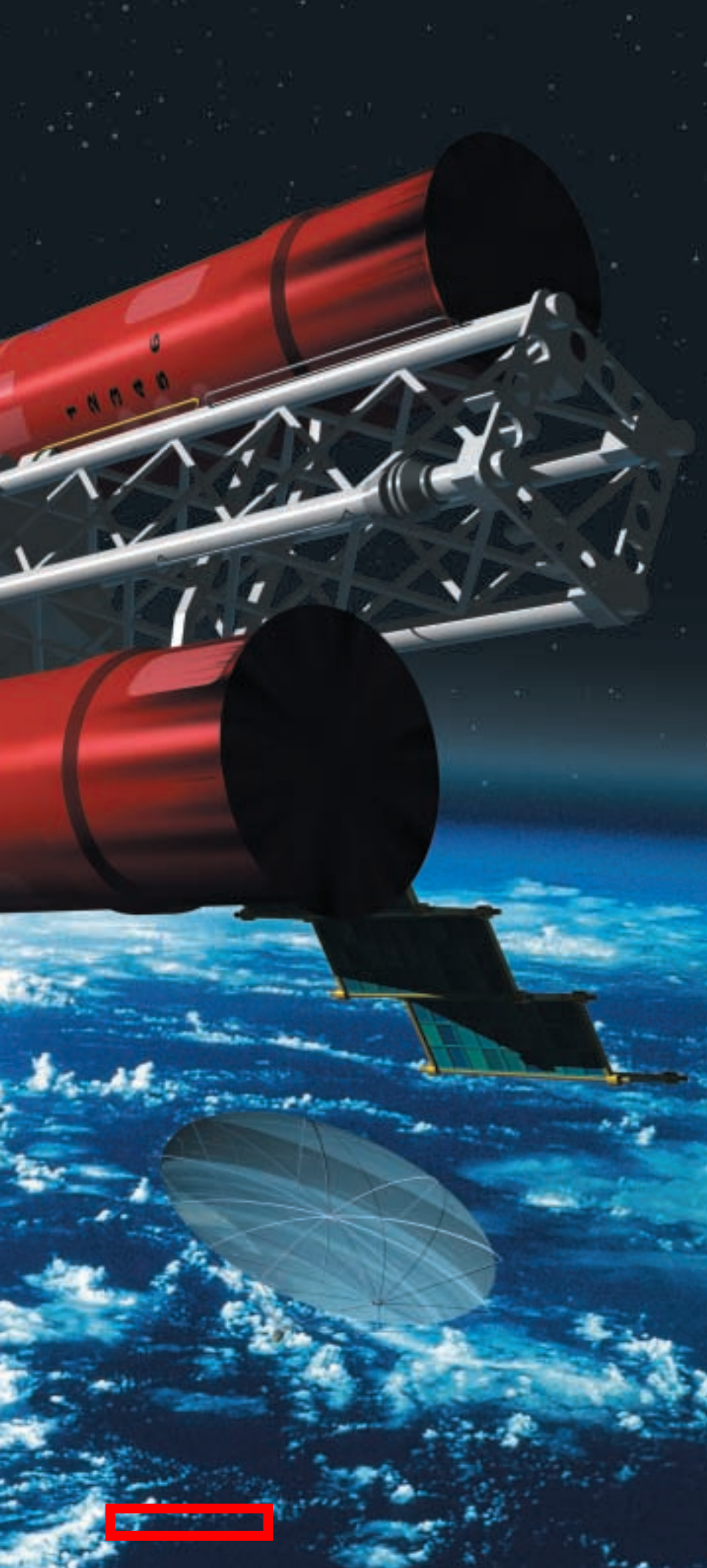
Ces résultats guident le choix de méthodes de conservation des plantes trompeuses menacées, telles que l'orchidée *Dactylorhiza praetermissa*, protégée en Ile-de-France (voir la figure 2). Connaissant le nombre de trompeuses visitées et fécondées par pollinisateur pour une densité donnée, ainsi que des paramètres tels que la densité en pollinisateurs, on évalue le succès reproducteur des trompeuses (le taux d'accroissement de leur population). Par une gestion adéquate des populations de plantes nectarifères, on pourrait alors modifier l'abondance relative des plantes trompeuses vivant à proximité afin d'augmenter leur succès reproducteur. En outre, en veillant à maintenir ou à recréer le polymorphisme des formes florales (qui risque d'être perdu lorsqu'une population devient trop petite), on augmenterait aussi les chances de survie de petites populations de trompeuses.

Jean-Baptiste FERDY, Conservatoire botanique du Bassin parisien/MNHN

Le transport spatial du futur

TIM BEARDSLEY

Pour permettre l'exploration de l'espace lointain, les ingénieurs devront concevoir des moyens peu onéreux et efficaces. Les idées abondent.



L'année 1996 marque une étape dans l'histoire du transport spatial : pour la première fois, les bénéfices du secteur spatial (environ 500 milliards de francs) ont été supérieurs aux dépenses engagées dans ce domaine par les gouvernements. Cette croissance se poursuit. En 1997, on a pu lancer 158 satellites en orbite des «charges utiles». Selon les résultats des études de marché, les lancements commerciaux se multiplieront encore : entre 1998 et 2007, 1 200 satellites de télécommunications seront lancés. Les sommes en jeu lors de cette ruée vers l'espace sont supérieures à celles de la ruée vers l'or du siècle dernier.

Les passionnés d'espace attendent avec impatience le jour où chacun pourra s'envoler vers l'espace spatial, sur la Lune ou sur Mars. L'Association des transports spatiaux, un regroupement d'industriels, a récemment créé une division consacrée à la promotion du tourisme spatial, qu'elle considère comme un moyen viable de stimulation du développement économique au-delà de la Terre.

Sur ce chemin vers les étoiles, la principale pierre d'achoppement reste l'extrême difficulté du voyage dans l'espace. Même les mises en orbite sont coûteuses et risquées. Avec les techniques actuelles, les sondes n'atteignent que très lentement des destinations lointaines du système solaire : les engins spatiaux mettent des années à voya-

ger autour des planètes afin d'accélérer grâce à leur gravité. Avec les moyens actuels, le voyage vers d'autres systèmes planétaires prendrait plusieurs siècles.

Toutefois, les ingénieurs ne manquent pas d'idées pour mettre au point de nouveaux systèmes de propulsion qui étendraient la présence

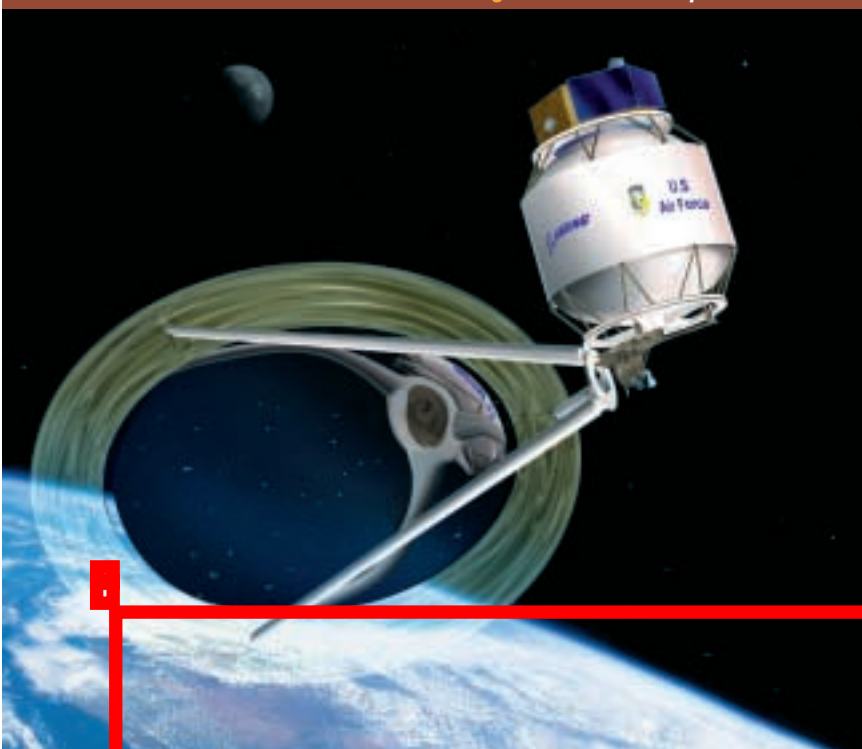
1. LES VAISSEAUX SPATIAUX DU FUTUR seront probablement très différents des modèles actuels. Une station à énergie solaire (en haut, à gauche), envoie des faisceaux de micro-ondes vers un vaisseau solaire (en bas, à gauche) propulsé par des forces magnétohydrodynamiques. Une navette spatiale (en arrière-plan, en bas) a libéré un satellite qu'un câble en rotation a capté (au premier plan). Un vaisseau propulsé par une fusée à un étage déploie un autre satellite (en bas, au centre), tandis qu'un vaisseau à voile solaire s'apprête à partir vers une destination lointaine (en bas, à droite).

Véhicule de transfert orbital solaire

Date de lancement prévue : 2002

Estimation du coût : 180 millions de francs

Source d'énergie : solaire thermique



Boeing

2. CE VÉHICULE DE TRANSFERT ORBITAL SOLAIRE sera construit par la Société Boeing. Il utilise un grand réflecteur qui focalise les rayons du Soleil sur un bloc de graphite. Chauffé à 2 100 degrés, ce dernier vaporise de l'hydrogène liquide stocké à bord, ce qui engendre une poussée. Le véhicule transfère en quelques semaines des charges utiles des orbites terrestres basses vers des orbites plus hautes. Ce véhicule solaire léger peut mettre des satellites en orbite à l'aide de fusées plus petites que les lanceurs classiques.

humaine au-delà de la Terre. Certains proposent des améliorations des fusées ou des techniques de propulsion existantes, d'autres cherchent à exploiter l'énergie nucléaire ou la poussée de puissants faisceaux laser. On a même envisagé des « ascenseurs », qui hisseraient des charges en orbite.

« Aller en orbite basse, et vous serez à mi-chemin de n'importe quelle destination du Système solaire », a écrit l'auteur de science-fiction américain Robert Heinlein. Les spécialistes admettent effectivement que l'exploration spatiale ne se développera pleinement que si l'on réduit les coûts d'accès aux orbites basses : la plupart des projets visant à mettre l'espace lointain à la portée de l'humanité sont fondés sur l'assemblage en orbite de volumineux engins spatiaux ou d'autres équipements.

Dès aujourd'hui, les États et les sociétés privées ont besoin de systèmes de lancement plus performants. La plupart des charges utiles commerciales sont destinées soit à l'orbite géostationnaire, déjà bien encombrée (à 36 000 km), soit au-dessus de l'équateur, soit à l'orbite terrestre basse, à quelques centaines de kilomètres d'altitude. L'orbite terrestre basse devient une zone d'intense activité spatiale, car les satellites qui y évoluent peuvent transmettre des données des océans à des scientifiques ou même à des récepteurs portables situés sur Terre.

Le nombre de satellites scientifiques augmentera également de manière importante : dans les dix prochaines années, plus de 50 observatoires et sondes d'exploration seront lancés. Les agences spatiales cherchent à faire des lanceurs plus rapides,

plus performants et moins chers (les missions scientifiques coûtent aujourd'hui trois fois moins cher qu'au début des années 1990). En outre, au cours des 15 années d'existence de la Station spatiale internationale, 43 lancements d'assemblage et des dizaines de lancements pour l'acheminement des équipements, du carburant et autre fret seront nécessaires. Une multitude de satellites d'observation de la Terre partiront également dans l'espace dans les prochaines années : satellites espions, satellites météorologiques ou encore plates-formes de surveillance de l'évolution du Globe. La demande pressante de lancements a déjà incité la Société norvégienne Kvaerner et la Société russe RSC Energia à créer une filiale nommée Sotkand, qui a transformé une plate-forme pétrolière en une base de lancement mobile semi-submersible. Cette plate-forme de 34 000 tonnes se déplacera jusqu'à des sites de lancement favorisant l'accès aux orbites choisies.

Après la ruée vers l'or

De nombreux scientifiques aimeraient disposer de plus d'engins spatiaux pour surveiller la Terre et explorer l'espace. Les plus visionnaires prévoient une industrie spatiale prospère, fondée sur l'exploitation des minéraux des astéroïdes ou des planètes, et sur l'extraction de gaz de leur atmosphère ; on produirait ainsi l'énergie et les denrées nécessaires à la vie dans l'espace. À l'Université d'Arizona, K. Sridhar a ainsi mis au point une pile électrochimique afin de fabriquer de l'oxygène à partir de l'atmosphère martienne. La Société SpaceDev a déjà mentionné son intention d'extraire des minéraux d'astéroïdes, ce qui lui a valu une plainte de la Commission des affaires boursières américaine pour son exaltation imprudente. Quelques rêveurs cherchent même à envoyer des sondes au-delà du Système solaire, dans l'espace interstellaire.

L'intérêt pour l'espace est d'autant plus remarquable que le coût en est extrêmement élevé. Avec les fusées classiques, pour la plupart mises au point par les États, chaque kilogramme placé en orbite terrestre basse revient à 120 000 francs. La navette spatiale, exploitée par les Sociétés Boeing et Lockheed Martin, devait être

un moyen bon marché d'aller dans l'espace, mais les lanceurs classiques sont coûteux que les lanceurs classiques. De plus, depuis la catastrophe de la navette *Challenger*, en 1986, la navette a été réservée aux études et à la recherche. Si l'on équipait une navette pour conduire 50 passagers dans l'espace, ceux-ci devraient payer chacun 50 millions de francs pour que l'exploitant rentre dans ses frais.

Aujourd'hui, le voyage spatial coûte cher, parce que les étages propulseurs comportent à la fois le comburant et le carburant pour leur court trajet ; sauf pour la navette spatiale, ces étages sont abandonnés et se consomment dans l'atmosphère après quelques heures de vol.

Pendant longtemps, les ingénieurs ont espéré réduire les coûts de lancement en construisant des engins réutilisables, qui ne nécessiteraient qu'un réapprovisionnement en carburant et quelques vérifications de routine entre les vols, comme les avions de ligne. Les agences spatiales du monde entier et quelques sociétés

apparaissent ces dernières années se consacrent à la réduction des coûts de lancement. La plupart cherchent à adapter les techniques existantes afin de proposer des lancements moins coûteux de petites charges utiles en orbite basse.

Toutefois, la construction de fusées, même classiques, reste difficile. Le premier lanceur *Delta 3* de la Société *Boeing*, la première grande fusée construite par le secteur privé, a explosé peu de temps après son décollage de Cap Canaveral, en août 1998. Une fusée *Titan 4A*, construite conjointement par l'armée américaine et par la Société *Lockheed Martin*, avait explosé au même endroit deux

la fusée européenne *Ariane 5*, en 1996, a été un échec cuisant en raison d'une erreur de conception dans le logiciel de vol. Aux États-Unis, au cours de la dernière décennie, des désaccords sur les financements ont conduit le gouvernement à abandonner plusieurs projets de mise au point de nouvelles fusées non réutilisables.

Les aventuriers

Les entrepreneurs sont toutefois tenaces. L'un d'eux, la Société *Kistler Aerospace*, construit les deux premiers lanceurs d'une série de cinq qui seront équipés de moteurs russes. Le premier étage de ces lanceurs reviendra vers son site de lancement ; le second tournera autour de la Terre avant de revenir. Les deux étages descendront en parachute et atterriront sur des coussins gonflables. La Société *Kistler* a rassemblé 2,6 milliards de francs, et elle cherche un financement supplémentaire de cet ordre. Malgré la crise financière mondiale, les dirigeants de cette société estiment que

commencer cette année. Une autre société, *Beal Aerospace Technologies*, construit un lanceur à trois étages qui devrait voler au cours du troisième trimestre de l'an 2000 ; une version réutilisable serait mise au point par la suite.

D'autres sociétés cherchent à réduire les coûts de lancement en utilisant l'oxygène de l'atmosphère.

Fusée à rotation Roton	Date de lancement prévue : 2000	Estimation du coût : 200 millions de francs	Source de propuls. : moteur rotatif à force centrifuge
Le Roton libère sa charge utile en orbite basse Les pales du rotor en rotation libre se déploient pour la descente L'engin commence son retournement et déploie son rotor La fusée entre dans l'atmosphère par la base Le Roton s'élève dans l'atmosphère grâce à son moteur rotatif Les pales sont mues par de petites fusées, et la stabilisation est effectuée par des propulseurs latéraux			

3. LE ROTON de la Société *Rotary Rocket* décolle verticalement, propulsé par un moteur de fusée rotatif. Après la libération de la charge utile, le véhicule retourne sur Terre en dépliant des pales

d'hélicoptère. Il rentre dans l'atmosphère par la base. Les pales sont d'abord en rotation passive, puis elles sont entraînées par de petites fusées montées à leurs extrémités lors de l'atterrissage vertical.

la masse de combustible emporté serait ainsi réduite. À cette fin, on envisage des véhicules qui décolleraient et atteriraient horizontalement. La Société *Pioneer Rocketplane* étudie ainsi un véhicule léger à deux places, propulsé par un moteur fusée et par des réacteurs classiques. Cet engin, avec une charge utile et un second étage dans sa petite soute à cargaison, similaire à celle de la navette, décollerait d'une piste à l'aide de ses réacteurs et monterait à 6 100 mètres. Là, un avion de ravitaillement lui fournirait 64 tonnes d'oxygène liquide. Après séparation des étages, l'engin servirait à la mise à feu du petit moteur fusée qui propulserait l'engin à Mach 15 (15 fois la vitesse du son, soit 18 500 kilomètres par heure) à 113 kilomètres d'altitude, où il larguerait sa charge utile et son second étage. La plus grosse difficulté est la mise au point d'un mécanisme sûr pour le transfert de l'oxygène liquide.

Inversement, un avion spatial à décollage horizontal est étudié par la Société *Kelly Space and Technology*. Cet *Astroliner* transporterait jusqu'à 32 tonnes de charge utile. C'est une petite navette qui serait remorquée jusqu'à 6 100 mètres d'altitude. Là, on testerait ses moteurs fusées et on déciderait si l'on doit les allumer, afin de propulser l'engin à 122 kilomètres d'altitude. En cas de mauvais fonctionnement des moteurs, l'*Astroliner* reviendrait vers le site de lancement. Les deux premiers véhicules devraient coûter près de trois milliards de francs.

D'autres sociétés explorent des techniques plus originales. L'un des projets les plus fascinants émane de la Société *Rotary Rocket*, qui construit une fusée habitée à décollage et atterrissage verticaux. La caractéristique originale du projet, nommé *Roton*, est son moteur : le comburant et le carburant alimenteront 96 chambres de combustion à l'intérieur d'un disque horizontal de sept mètres de diamètre qui tournera à 720 tours par minute avant le lancement. La force centrifuge, créée par la rotation, assurera la combustion, éviterait les turbopompes, moins sûres et coûteuses. Le *Roton* redescendrait à l'aide de pales d'hélicoptères repliables, mises en rotation par de petites fusées montées à leur extrémité, comme un soleil pyrotechnique (voir la figure 3). La Société *Rotary Rocket* estime ainsi réduire le prix de la mise en orbite terrestre basse

Les moteurs aérobies

Charles McClinton

Depuis des années, les ingénieurs rêvent de construire un avion qui atteindrait des vitesses hypersoniques, supérieures à Mach 5 (cinq fois la vitesse du son). Propulsé par un réacteur qui consommerait l'oxygène de l'air, un avion hypersonique pourrait même se mettre en orbite. Les progrès de l'aéronautique et les besoins de l'aérospatiale ont récemment conduit les ingénieurs à étudier de tels systèmes.

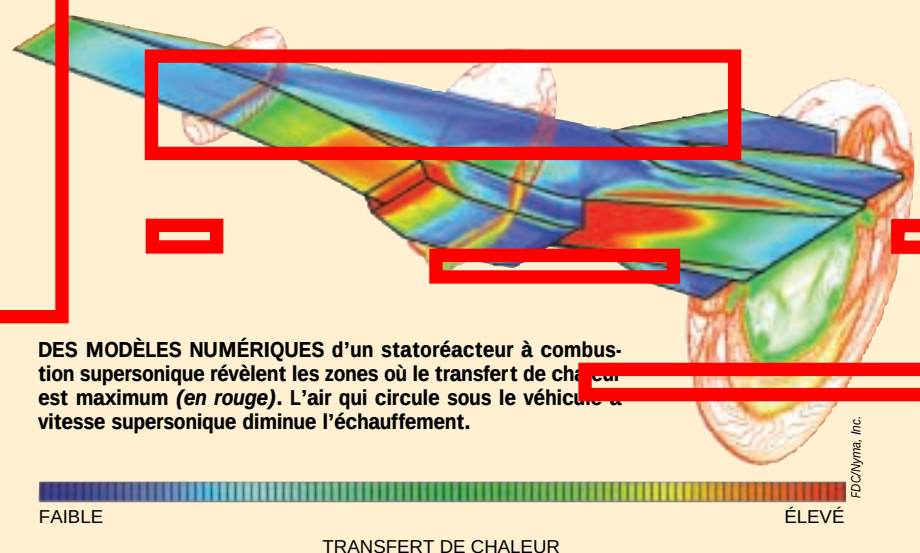
Les moteurs «aérobies» présentent plusieurs avantages par rapport aux fusées : utilisant l'oxygène de l'atmosphère, ils ne consomment pas de comburant, ce qui les allège et réduit le coût de leur fonctionnement. En outre, les véhicules à moteurs aérobies exploitent plus les forces de portance que la poussée, de sorte qu'ils sont plus maniables et plus sûrs : en cas de panne de moteur, le véhicule revient vers la Terre en vol plané. Les missions sont également plus flexibles.

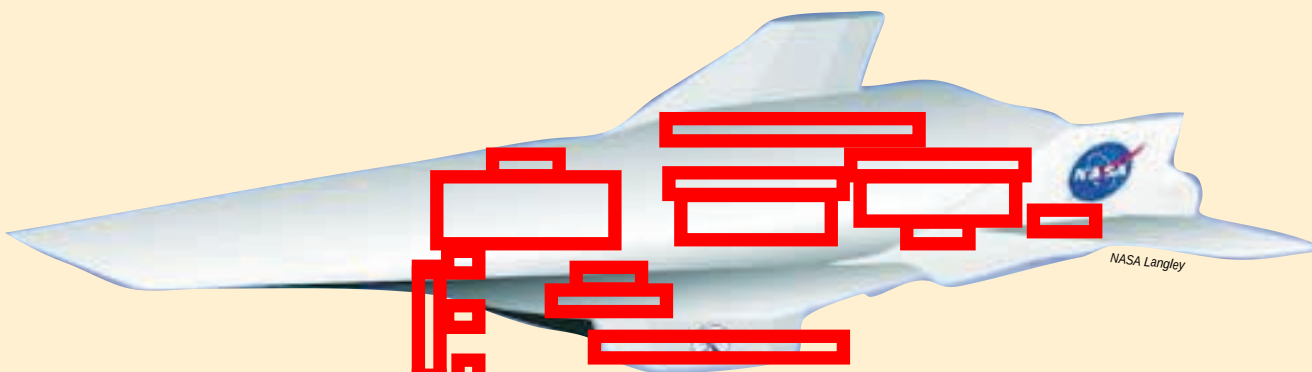
Malheureusement, les moteurs aérobies sont moins perfectionnés que les fusées étudiées depuis 40 ans. Certes, les ingénieurs maîtrisent bien les turboréacteurs, qui fonctionnent par compression de l'air, combustion du mélange et de la détente des produits de combustion. Cependant, les turboréacteurs actuels ne propulsent les avions qu'à des vitesses inférieures à Mach 4 ; au-delà, la température des pièces qui se trouvent dans le moteur devient trop élevée.

Heureusement, à ces vitesses supersoniques, la turbine devient superflue si le moteur est équipé d'une prise d'air qui comprime et ralentit l'air en mouvement. Ces statoréacteurs ne pouvant fonctionner qu'à grandes vitesses, on les a associés à des turboréacteurs, comme sur l'avion expérimental français *Griffon II*, qui a atteint la vitesse de 2 330 kilomètres par heure lors d'un vol en 1959. Des statoréacteurs ont également été associés à des fusées dans des missiles.

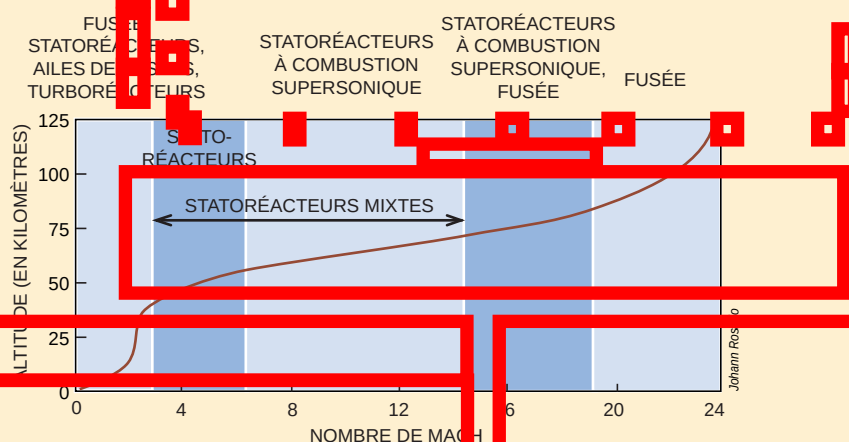
À des vitesses supérieures à Mach 6, la chambre de combustion atteint une température telle que les produits de combustion (l'eau) se décomposent. Pour atteindre des vitesses supérieures, les statoréacteurs à combustion supersonique doivent réduire la pression de l'air à l'entrée ; l'écoulement de l'air dans le réacteur restant supersonique, sa température n'augmente pas autant que dans les statoréacteurs classiques. Le carburant est injecté dans l'air supersonique auquel il se mélange et où il doit brûler en une milliseconde. La vitesse maximale des statoréacteurs à combustion supersonique (nommés *scramjet*) reste à déterminer, mais elle semble être supérieure à la vitesse de satellisation (Mach 20 à 25). Toutefois, à ces vitesses considérables, les avantages des statoréacteurs à combustion supersonique par rapport aux fusées sont minimes, voire discutables, en raison des fortes contraintes structurales que leur conception engendre.

Des moteurs aérobies hypersoniques fonctionnent avec des carburants variés, tels l'hydrogène et les hydrocarbures. L'hydrogène liquide qu'utilise la navette spatiale américaine ou le lanceur européen *Ariane 5* est avantageux, car il refroidit le moteur et le véhicule





MÉTHODE DE PROPULSION



LES STATORÉACTEURS À COMBUSTION SUPERSONIQUE brûlent de grandes quantités d'air, au-dessous de l'avion, pour faire brûler un carburant tel que l'hydrogène liquide. Des statoréacteurs à double mode de fonctionnement pourraient être associés à des fusées (graphique) dans un véhicule qui «volerait» vers l'espace.

avant le lancement. Les hydrocarbures, moins efficaces, limitent la vitesse à environ Mach 8.

Dans un véhicule propulsé par un statoréacteur à combustion supersonique, la compression est assurée par la partie inférieure du véhicule. En général, cette déviation crée une discontinuité de la pression, nommée onde de choc. Cette onde de choc est dirigée vers le moteur. L'air s'échauffe quand il est ralenti et quand le carburant se consume dans la chambre de combustion. Le produit de la réaction se détend dans une tuyère interne et externe, ce qui engendre la poussée. Les pressions élevées sur la partie inférieure du véhicule créent également une portance.

Pour élargir le domaine de fonctionnement des statoréacteurs à combustion supersonique, les ingénieurs ont conçu des véhicules mixtes, qui volent soit en mode statoréacteur simple, soit en mode combustion supersonique.

Comme les statoréacteurs classiques ou à combustion supersonique ne fonctionnent efficacement que s'ils se déplacent à plus de Mach 2 ou 3, une propulsion additionnelle (turboréacteur ou fusée) est nécessaire à faible vitesse. Les «moteurs fusées à cycles combinés», qui seraient utilisables pour un véhicule spatial, sont fondés sur une architecture combinée : une fusée intégrée dans la chambre de combustion du statoréacteur crée la poussée du décollage jusqu'aux vitesses subsoniques, puis des statoréacteurs

accélèrent jusqu'à la vitesse du son ; le fonctionnement en mode statoréacteur passe en propulsion à combustion supersonique jusqu'à au moins Mach 10 ou 12, puis la fusée reprend le relais pour propulser le véhicule en orbite et le manœuvre dans l'espace.

Beaucoup reste à faire avant que les statoréacteurs à combustion supersonique soient au point. Grâce à des méthodes numériques élaborées, on a établi les plans d'un véhicule de lancement avec un statoréacteur à combustion supersonique intégré dans sa structure. Les ingénieurs doivent encore trouver des matériaux légers et résistants à la chaleur pour revêtir les systèmes qui assureront un mélange de carburant et une combustion rapides et efficaces.

Dans les années 1970, le Centre de recherche Langley de la NASA a démontré la faisabilité des statoréacteurs à combustion supersonique sur des modèles de véhicules hypersoniques en soufflerie. Puis des équipes anglaises et françaises, notamment, ont testé ces systèmes au sol. Aujourd'hui, les ingénieurs testent, au sol toujours, des prototypes dans des conditions qui reproduisent celles qu'un avion rencontrerait à Mach 15. Au cours d'essais en vol, les Russes ont fait fonctionner des statoréacteurs en double mode jusqu'à une vitesse de Mach 6,4.

Charles MCCLINTON est directeur technique du programme Hyper-X au Centre de recherche Langley de la NASA.

à un dixième du prix actuel. Le premier vol orbital est prévu en l'an 2000. Les chambres de combustion sont en phase de test, et les premiers vols atmosphériques devraient avoir lieu cette année.

La Société californienne *Space Access* étudie un véhicule totalement différent, mais tout aussi novateur : un lourd avion spatial devrait décoller et atterrir horizontalement, propulsé par un moteur nommé statoréacteur à éjecteur. Ce nouveau moteur, déjà testé au sol, propulsera le véhicule de l'arrêt jusqu'à Mach 6 (7 300 kilomètres par heure) une performance bien au-delà de toutes les possibilités actuelles. Ce moteur serait une dizaine de fois plus performant que n'importe quel moteur existant.

À Mach 6, on allumera deux fusées à hydrogène liquide. À Mach 9 (11 000 kilomètres par heure), son nez s'ouvrira comme la mâchoire d'un crocodile, libérant deux autres fusées. Les sixième étages, ainsi que la charge utile (voir la figure 4). Tous les étages, équipés d'ailes, retourneront vers la Terre, où ils atterriront horizontalement sur la piste de lancement. L'avion de *Space Access* emportera des charges utiles d'environ 4 tonnes, comme la navette spatiale. Le service commercial pourrait débuter en 2003.

Le plus gros lanceur en projet est le X-33 de la Société *Skunk Works*. C'est un engin d'essai, deux fois plus petit que le futur «moteur aérodynamique linéaire», dont il teste le principe. En théorie, le X-33 pourrait propulser un véhicule entièrement réutilisable, à décollage vertical ; un seul étage de moteurs s'adaptera automatiquement aux variations de pression atmosphérique. Malgré la difficulté de sa réalisation, le moteur X-33 ne pourra assurer la mise en orbite de charges. En outre, les difficultés de construction ont retardé de six mois son premier vol, qui devrait avoir lieu à la fin de 1999. Selon les ingénieurs de la NASA, on devra poursuivre les études un an ou deux avant de décider la construction d'un véhicule de cette nature fondé sur le principe du X-33. Notamment, on ne dispose d'aucun autoclave assez grand pour durcir le réservoir d'hydrogène liquide, en matériaux composites, et l'on doit perfectionner les tuiles métalliques qui protégeront le véhicule de la chaleur engendrée par la rentrée dans l'atmosphère.

Les câbles spatiaux

Robert Forward et Robert Hoyt

Lorsque l'humanité colonisera la Lune et d'autres planètes, utilisera-t-elle des fusées ou une technique aussi rudimentaire que la corde ?

La question est sérieusement à l'étude, car les ingénieurs ont montré que des systèmes de cordes, ou, plus exactement, de câbles, peuvent propulser des objets dans l'espace de deux façons. D'une part, un câble épais, reliant deux satellites, peut permettre à l'un d'eux de propulser l'autre sur une orbite différente, un peu à la manière d'une fronde. On peut adapter ce concept au transport de charges utiles vers la Lune ou au-delà. D'autre part, un câble conducteur qui balayerait l'espace et, notamment, le champ magnétique terrestre, serait le siège de forces propulsives s'il était parcouru par un courant, comme maintenant la loi d'Ampère. L'avantage principal des câbles serait leur faible coût d'exploitation. Au lieu de consommer d'énormes quantités de propergols, ils fonctionneraient en récupérant une partie de la quantité de mouvement d'un corps déjà en orbite ou en utilisant l'énergie électrique fournie par des panneaux solaires.

À ce jour, 17 missions spatiales ont utilisé des câbles. La plupart d'entre elles ont été des succès, mais le public a surtout entendu parler de deux échecs. En 1992, un satellite construit par l'Agence spatiale italienne devait être lâché loin de la Terre, à partir de la navette spatiale *Atlantis*, à l'extrémité d'un long câble constitué de fils de cuivre isolés, mais le mécanisme de déroulage s'est bloqué et l'expérience a été interrompue.

Quatre ans plus tard, au cours d'une mission de la NASA, 20 kilomètres de câble ont été déroulés ; le déplacement de la navette à travers le champ magnétique de la Terre a engendré une tension

le câble, entre la navette et le satellite. L'expérience a montré que ces câbles électrodynamiques peuvent transformer l'énergie orbitale de la navette en énergie électrique, et réciproquement. Malheureusement, le câble a subi un déploiement qui brûla et cassa le câble. Malgré l'échec de la partie électrodynamique du projet, cet échec illustre de manière spectaculaire le transfert de quantité de mouvement. Lors de la création de l'arc, le satellite italien se trouvait à 20 kilomètres au-dessus de la navette, et il était tiré à une vitesse supérieure à la vitesse orbitale de cette altitude élevée. Ainsi, lorsque le câble s'est rompu, la quantité de mouvement excédentaire a fait monter le satellite à sept fois la longueur du câble, soit à 140 kilomètres au-dessus de la navette.

D'autres tests ont mieux réussi. En 1993, des ingénieurs ont déroulé vers la Terre un câble attaché à un grand satellite avec une charge utile à son extrémité. La charge utile, reliée au satellite par ce câble de 20 kilomètres de long, tournait alors moins vite que la vitesse orbitale nécessaire au maintien en orbite d'un objet se trouvant à cette altitude (pour une orbite circulaire, la vitesse du satellite diminue quand l'altitude augmente). La coupure du câble à un moment approprié déclencha la descente de la charge utile vers un point prédéterminé de la surface terrestre. Une telle capsule de rentrée atmosphérique pourrait être utilisée par la Station spatiale internationale pour le retour rapide des charges utiles vers la Terre, notamment pour le matériel scientifique qui ne peut attendre la prochaine arrivée de la navette.

En 1994, au cours d'une mission similaire, on a attaché une charge utile au bout d'un câble de 20 kilomètres de long pour étudier combien de temps le câble, d'une épaisseur équivalente à celle d'une corde de golf volant, résisterait aux impacts de micrométéorites et de débris spatiaux. Comme une particule rapide de la taille d'un grain de sable pouvait facilement couper ce câble, les ingénieurs avaient estimé que sa durée de vie serait de douze jours. Après quatre jours seulement, il était déjà coupé.

Comment tresser les fils de façon qu'ils ne soient pas tous coupés par une même particule ? Que si l'un d'eux lâche, les autres conservent la liaison ? Des ingénieurs ont utilisé des fibres de polymères très résistantes, le Spectra, pour fabriquer une tresse tressée de 2,5 millimètres de diamètre, entourée de fils lâches. Un tel câble de quatre kilomètres de long, tendu entre deux satellites lancés en juin 1996, est resté en orbite sans avoir été coupé pendant presque trois ans.

Une autre architecture de câble a également été testée : une mince bande de plastique de trois centimètres de large, garnie de brins de fibres solides sur toute sa longueur. Le câble de six kilomètres devrait résister pendant plusieurs années dans l'espace, mais la bande l'alourdit. Nous cherchons aujourd'hui à alléger ce câble plat, en concevant des câbles multifilaires à motif ajouré, comme un filet ; la masse sera inférieure, et la durée de vie dans l'espace devrait atteindre plusieurs décennies.

Des câbles électrodynamiques vont également être essayés. Vers le milieu de l'an 2000, une mission de la NASA démontrera qu'un câble conducteur permet d'abaisser l'orbite de l'étage supérieur d'un lanceur Delta 2. À la Société Tethers Unlimited, nous mettons au point une version commerciale de cette idée : un petit caisson serait attaché à un satellite ou à l'étage supérieur avant le lancement. À l'achèvement de la mission ou en cas de dysfonctionnement, le câble conducteur serait déployé et, freiné par le champ magnétique de la Terre, il ferait rapidement perdre de l'altitude au véhicule jusqu'à ce qu'il brûle dans l'atmosphère supérieure. Nous prévoyons, à la fin de l'an 2000, sur un étage supérieur de fusée construit par la Société russe Lavochkin Association.

La NASA envisage également d'utiliser des câbles électrodynamiques pour une propulsion ascendante. Dans ce système, des panneaux solaires fourniraient un flux d'électricité à travers le câble pour la propulser dans le champ magnétique terrestre. La force résultante monterait des charges utiles autour de la Terre. On maintiendrait ainsi la Station spatiale internationale en orbite, ce qui éviterait les ravitaillements en carburant.

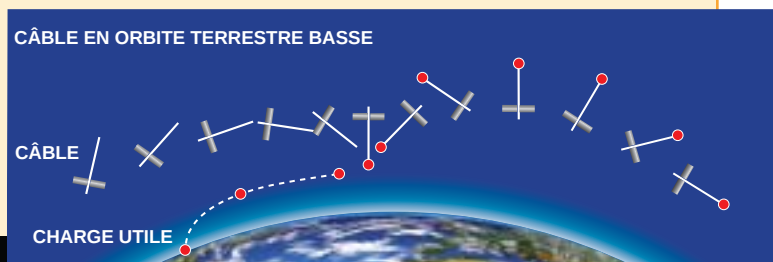
Jusqu'où les câbles emporteraient-ils l'humanité ? Nous avons analysé un système de câbles tournant, de plusieurs centaines de kilomètres de long, en orbite, qui enverraient des charges utiles vers la Lune, et même plus loin. Tel Tarzan qui se balance de liane en liane, on accrocherait d'abord une charge utile, à l'aide d'un véhicule de lancement réutilisable, sur un câble en orbite terrestre basse, on transférerait la charge à un

autre câble sur une orbite terrestre elliptique plus éloignée ; le deuxième câble lancerait alors l'objet vers la Lune, ou il serait capturé par un câble en orbite lunaire.

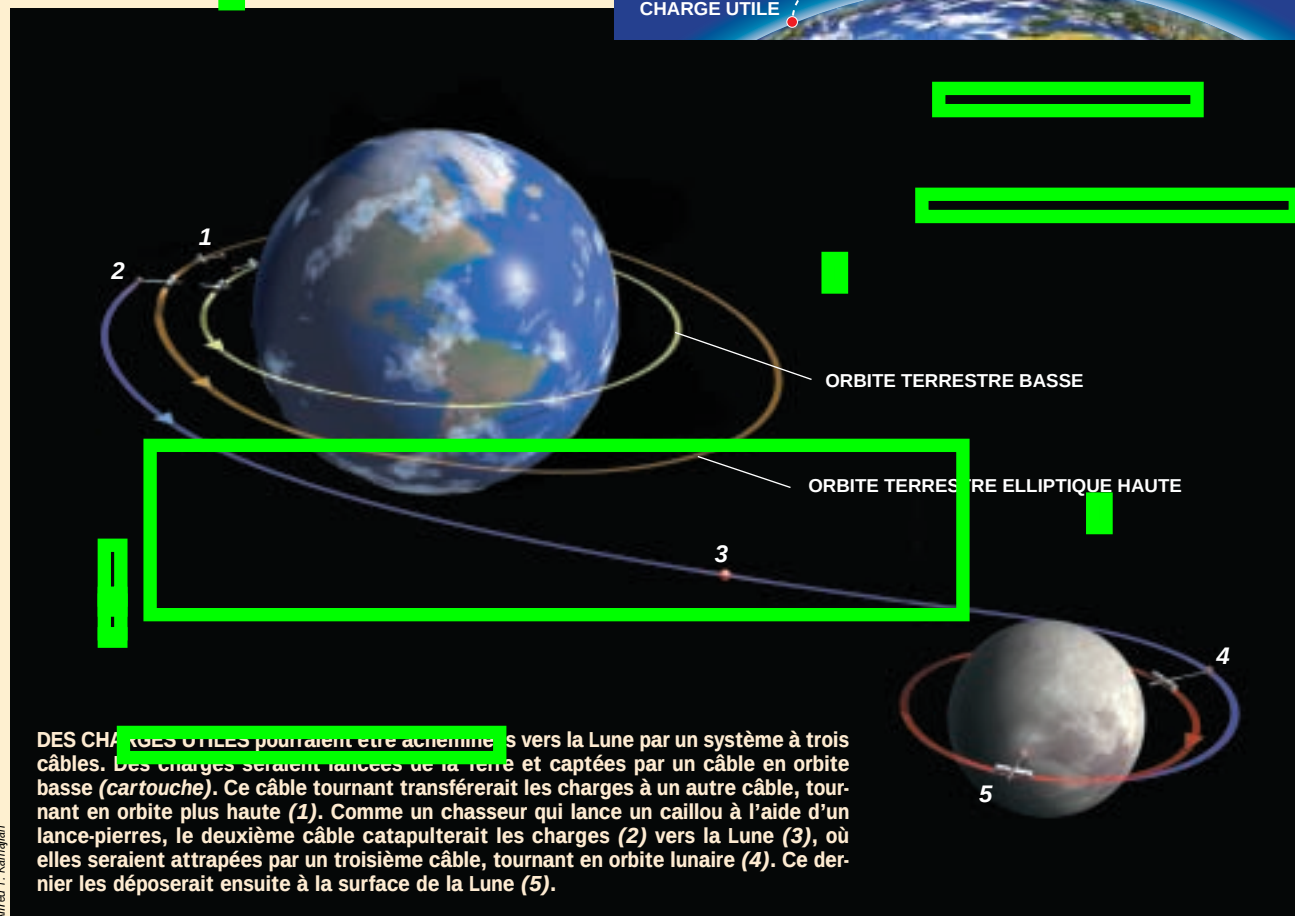
Le câble lunaire tournerait autour de la Lune à une vitesse telle que, une fois la charge utile capturée, il déposerait l'objet en douceur, à la surface de la Lune, une demi-rotation plus tard. Simultanément, le câble lunaire prendrait en charge un objet à retourner vers la Terre. Aucun carburant ne serait nécessaire si la masse à déposer et la masse à reprendre sont égales. En ce mécanisme de transport fort simple, une navette, faisant du voyage lunaire un événement fréquent et banal.

De nombreux défis techniques restent à relever avant que ce système devienne une réalité, mais il est porteur d'un énorme potentiel. Aujourd'hui, des câbles tournent autour de nombreuses planètes et de leurs satellites, transporteront-ils les marchandises d'un commerce interplanétaire florissant.

Robert FORWARD et Robert HOYT sont les fondateurs de la Société Tethers Unlimited.



Johann Rosario



Alfred T. Kamajian

Le projet *VentureStar*, dont le X-33 est l'amorce, a été décidé par le Congrès américain, mais le premier *VentureStar* ne sera pas habité. Afin de prévoir les vols habités, la NASA a récemment demandé aux industriels d'étudier un véhicule expérimental de taille réduite, le X-34.

Pour les techniques de l'après X-33 et X-34, la NASA a récemment renforcé ses travaux sur les moteurs d'avions hypersoniques, relégués au second plan depuis l'annulation du programme d'avion aérospatial en novembre 1994. Des statoréacteurs à combustion supersonique (*scramjet*), variantes des statoréacteurs classiques, mais qui fonctionnent à des vitesses supersoniques (Mach 5 à Mach 16, soit 7 200 à 21 600 kilomètres par heure), pourraient équiper un engin orbital à un seul étage. À partir de l'an 2000, plusieurs avions équipés de ces statoréacteurs, nommés X-43, voleront sans pilote jusqu'à Mach 10 (12 200 kilomètres par heure), puis s'échoueront dans l'océan Pacifique (voir l'encadré de la page 40).

Au-delà de la Terre

Dès qu'un vaisseau spatial quitte l'atmosphère et atteint une vitesse orbitale (environ Mach 25), les contraintes changent de nature. Notamment, le véhicule n'a plus à vaincre la gravité terrestre et la résistance de l'air. Plusieurs types de moteurs sont à l'étude, notamment le moteur ionique qui équipe aujourd'hui la sonde *Deep Space 1* de la NASA. Les moteurs ioniques fonctionnent en accélérant les atomes chargés (ou ions) d'un gaz à l'aide d'un courant électrique de haute tension. En quittant le moteur, les ions produisent une poussée. Le gaz le plus utilisé est le xénon.

Sur la sonde *Deep Space 1*, l'énergie est fournie par des panneaux solaires, mais, en théorie, n'importe quel générateur électrique est envisageable. Les moteurs ioniques fournissent dix fois plus de poussée par kilogramme de gaz brûlé (xénon) que les moteurs chimiques, de sorte que le moteur peut emporter moins de gaz. Ainsi, les moteurs ioniques, fonctionnant en continu pendant des années, permettraient à des engins spatiaux d'atteindre des vitesses considérables. Ils autoriseraient des missions d'exploration très longues, vers Uranus et vers Neptune,

Les vaisseaux photoniques

LEIK MYRABO

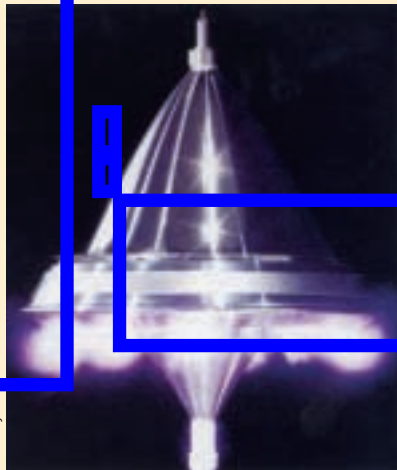
Les vaisseaux spatiaux actuels emportent avec eux leur énergie. On réduirait considérablement le coût des voyages spatiaux en poussant les vaisseaux avec de la lumière laser ou avec des micro-ondes. Au cours des dernières années, des expériences financées par la NASA et par l'armée américaine ont démontré la faisabilité de vaisseaux spatiaux photoniques, poussés par un faisceau laser infrarouge pulsé, émis de la Terre. Les surfaces réfléchissantes du véhicule concentrent le faisceau en un anneau où il chauffe l'air jusqu'à une température d'environ 30 000 degrés (cinq fois la température de la surface solaire). La dilatation explosive de l'air ainsi chauffé engendre la poussée.

En utilisant un laser militaire à dioxyde de carbone de dix kilowatts, qui émettait 28 impulsions par seconde, Franklin Mead et moi-même avons propulsé une maquette d'une dizaine de centimètres de diamètre, stabilisée par rotation, à une hauteur de plus de 30 mètres en trois secondes. Nous avons le financement pour porter la puissance du laser à 100 kilowatts, ce qui permettra d'effectuer des vols jusqu'à 30 kilomètres d'altitude. Nos maquettes actuelles pèsent moins de 50 grammes, mais, d'ici à cinq ans, nous pensons accélérer un microsatellite de un kilogramme et l'injecter en orbite terrestre basse grâce à un laser classique de un mégawatt de puissance, et ceci pour quelques centaines de francs d'électricité.

Les maquettes que nous utilisons, en aluminium ordinaire, comprennent une coque, un capot en forme d'anneau et une partie arrière, formée d'une tuyère. Durant le vol atmosphérique, la section antérieure comprime l'air et le dirige vers l'entrée du moteur. Le capot annulaire reçoit le plus gros de la poussée. La partie arrière sert de miroir collecteur parabolique qui concentre la lumière laser infrarouge en un anneau, tout en fournissant une autre surface sur laquelle la sortie de l'air chaud exerce sa pression. Le système est auto-stabilisé. Si le vaisseau se déplace en dehors du faisceau, la poussée l'incline et le remet dans le droit chemin.

Nous envisageons que des vaisseaux spatiaux photoniques de un kilogramme accélèrent ainsi jusqu'à environ Mach 5 et atteignent une altitude de 30 kilomètres, puis passent en mode propulsion en consommant de l'hydrogène liquide embarqué, lorsque l'air se raréfiera. Un kilogramme d'hydrogène devrait suffire pour mener le vaisseau en orbite. On envisage de 2,7 mètre de diamètre, on devrait injecter en orbite des microsatellites de 100 kilogrammes. Comme le faisceau que nous utilisons est pulsé, on devrait atteindre cette puissance en combinant plusieurs lasers. Ceux-ci lanceraient des satellites de communications et les « désorbiteraient » lorsqu'ils seraient devenus obsolètes.

Des astronautes photoniques de structure différente pourraient se déplacer vers leur source d'énergie, au lieu de s'en éloigner. Ces systèmes transporteraient des marchandises autour du Globe à faible coût. À la place de lasers, on pourrait aussi utiliser des faisceaux de micro-ondes. La densité de puissance des micro-ondes est inférieure à celle des lasers, de sorte que les véhicules devront être plus grands, mais les sources de micro-ondes sont beaucoup moins chères et plus faciles à adapter aux puissances élevées.

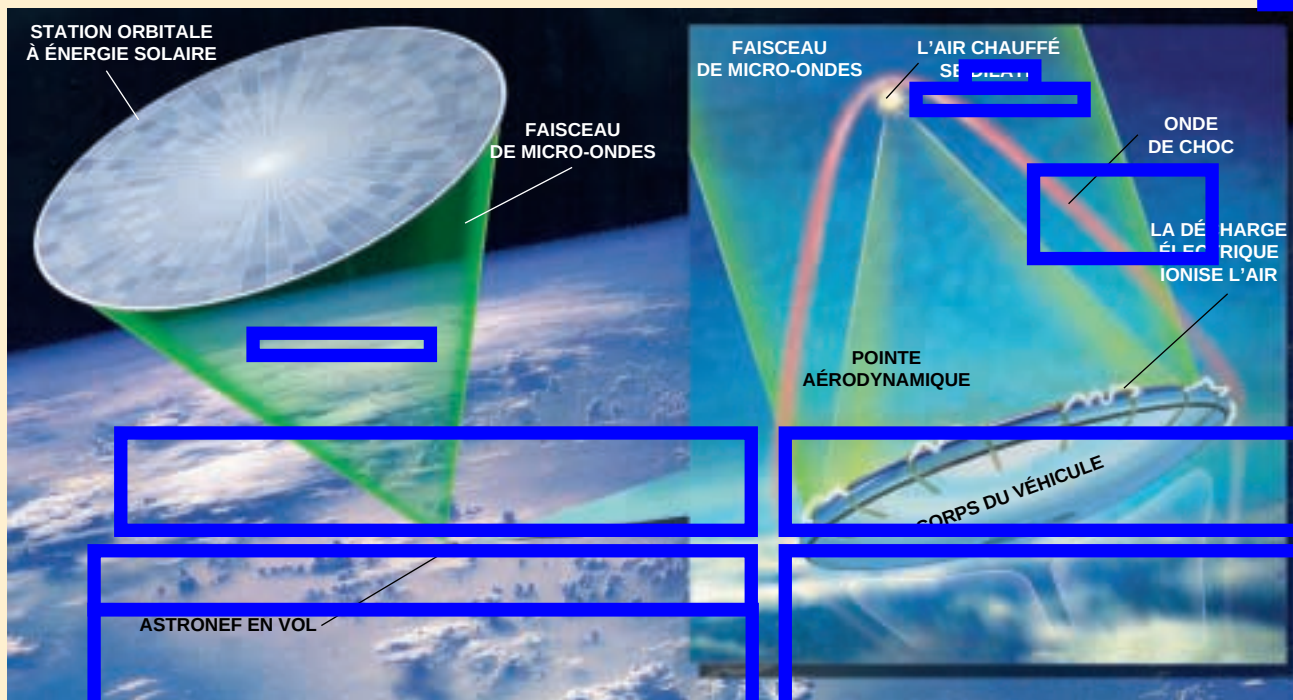


UNE MAQUETTE DE VAISSEAU SPATIAL PHOTONIQUE a déjà volé à 30 mètres de haut au cours d'essais ; elle était propulsée par un laser de dix kilowatts. Des systèmes plus grands devraient pouvoir être mis en orbite.

J'ai également conçu des vaisseaux plus élaborés, afin de transporter des passagers. Ces vaisseaux seraient plus adaptés pour le transport de marchandises lourdes, car ils engendrent leur poussée de manière plus efficace.

On pourrait installer sur le vaisseau concentrer une partie de l'énergie incidente en un point situé au-dessus du véhicule, à une distance égale à son diamètre. La chaleur intense y créerait «une pointe aérodynamique», laquelle dévierait l'air qui arriverait sur le véhicule. La traînée hydrodynamique et l'échauffement du véhicule seraient ainsi réduits.

Ce vaisseau utiliserait une partie de l'énergie supplémentaire qui engendrerait de puissants champs électriques autour de la monture, ce qui ioniserait l'air ambiant. Il utiliserait également des aimants supraconducteurs pour créer d'intenses champs magnétiques dans cette région. Lorsque l'air ionisé traverserait les champs électriques et magnétiques



UNE STATION ORBITALE À ÉNERGIE SOLAIRE (en haut, à gauche) pourrait faire monter en orbite un astronef photonique en lui envoyant de l'énergie sous forme de micro-ondes (à droite). L'astronef serait propulsé par une poussée magnétohydrodynamique. Il concentre-

rait l'énergie des micro-ondes et créerait une «pointe aérodynamique» qui léviterait le flot d'air. Des électrodes placées sur la monture du véhicule ioniseraient l'air et accroîtraient la poussée par magnétohydrodynamique.

ainsi créés, des forces magnétohydrodynamiques accéléreraient l'air, ce qui créerait une poussée supplémentaire.

En variant la quantité d'énergie émise vers l'avant, le vaisseau spatial photonique commanderait le flux d'air autour du véhicule. En avril 1995, à l'aide d'une pointe aérodynamique placée dans un tunnel à choc hypersonique, j'ai étudié la réduction de la résistance à l'avancement avec une torche à plasma chauffé électriquement à la place du laser. Les essais de magnétohydrodynamique, pour un engin de 15 centimètres de diamètre, viennent de commencer. Un vaisseau spatial photonique de ce type de la taille d'un homme, propulsé par micro-ondes ou par un laser pulsé de 1 000 mégawatts devrait fonctionner jusqu'à 50 kilomètres d'altitude et atteindre facilement les vitesses orbitales.

Les astronefs photoniques pourraient révolutionner le transport spatial s'ils sont envoyés à partir de stations orbitales alimentées à l'énergie solaire. Toutefois, le coût d'assemblage de l'infrastructure orbitale devra être réduit à moins de quelques centaines de francs par kilogramme (pour des lanceurs classiques, il est aujourd'hui de 120 000 francs par kilogramme de charge utile).

Pour réduire les coûts, je propose que l'on construise une station orbitale fonctionnant à l'énergie solaire. Imaginez une structure de un kilomètre de diamètre construite comme une roue de bicyclette géante, en orbite à 500 kilomètres d'altitude. Sa masse serait de l'ordre de 1 000 tonnes, et une lente rotation sur elle-même la stabiliserait par l'effet gyroscopique (un objet qui tourne conserve mieux son orientation). Outre des «rayons» structuraux, la roue comporterait un disque constitué de 55 grands quartiers en carbure de silicium d'une surface de 0,22 m² chacun. Les faces de chaque quartier, un panneau photovoltaïque à un rendement de 30 pour cent fournirait 320 mégawatts d'électricité (de tels systèmes devraient voir le jour d'ici une décennie). Sur l'autre face, 13,2 milliards d'émetteurs miniatures à semi-conducteurs, chacun d'une largeur de 8,5 millimètres seulement, produiraient un faisceau micro-ondes de 1,5 watt.

Les présentes fusées chimiques actuelles pourraient placer en orbite cette structure en 55 lancements, pour un coût total de 30 milliards de francs. La station serait mise en rotation par un système de stockage d'énergie formé de deux câbles supraconducteurs, chacun d'une masse de 100 tonnes, qui pourraient être chargés par des courants électriques opposés. (Cette disposition éliminerait le gigantesque couple magnétique engendré par un câble unique.)

En deux rotations autour de la Terre, la station chargerait entièrement ce système de 1 800 gigajoules d'énergie. Elle rayonnerait ensuite 4,3 gigawatts, sous la forme de micro-ondes, vers des vaisseaux spatiaux photoniques à une distance de plus de 1 000 kilomètres. Des couples mécaniques engendrés par le transfert de petites quantités de courant d'un câble à l'autre permettraient d'orienter la station, mais la commande précise des astronefs serait assurée par des balises embarquées qui enverraient les signaux de coordination des émetteurs individuels de la station, ce qui créerait une plage de dix mètres de diamètre sur le site de lancement. Les astronefs atteindraient l'orbite en moins de cinq minutes. Leurs occupants seraient soumis à une accélération d'à peine trois fois l'accélération de la pesanteur, environ la même que celle subie par les astronautes de la navette spatiale. La station à énergie solaire pourrait également émettre la totalité de son énergie dans une décharge de 54 secondes qui offrirait une poussée verticale de presque 20 fois l'accélération de la pesanteur vers l'orbite géostationnaire ou même pour atteindre la vitesse de libération du champ gravitationnel terrestre.

La première station orbitale à énergie solaire ouvrira la voie à toute une industrie de stations orbitales, lancées et assemblées à partir de vaisseaux spatiaux photoniques spécialisés. D'ici à quelques décennies, une flotte de ces vaisseaux permettra d'effectuer des voyages rapides et à faible coût autour du Globe, vers la Lune et au-delà.

Leik Myrabo enseigne la physique pour l'ingénieur à l'Institut polytechnique Rensselaer (New York).

qui renverraient bien plus de données que les survols de *Voyager 2* dans les années 1980.

Un autre type de moteur ionique, nommé propulseur à effet Hall, accélère également des ions, mais avec une configuration différente. Ces propulseurs utilisent un champ électrique et un champ magnétique radial qui dirigent les ions, mais, pour une même taille, la poussée est quatre fois supérieure. La société européenne de propulsion a mis au point un tel moteur qui devra voler sur le satellite français de télécommunication *Stentor*. Pour le moment, on ne peut tester ces systèmes que dans l'espace proche, mais, si les performances s'améliorent, on étendra leur champ d'application. Le gouvernement américain a déjà équipé un satellite militaire d'un tel moteur, et les satellites des flottes de télécommunications *Teledesic* et *Skynet* utilisent des propulseurs à effet Hall.

Aujourd'hui, des cellules photovoltaïques alimentent en électricité la plupart des satellites en orbite proche de la Terre. Les ingénieurs cherchent à les améliorer à l'aide de lentilles, qui focalisent la lumière solaire sur les cellules. La sonde *Deep Space 1* est équipée de tels panneaux.

Au lieu de transformer l'énergie solaire en électricité, ne pourrait-on pas l'utiliser directement pour pousser les satellites? L'armée américaine a voté un budget de 290 millions de francs pour la mise au point d'un étage terminal de fusée à énergie solaire qui transférerait les satellites d'une orbite terrestre basse à l'orbite géostationnaire pour une fraction seulement du coût des fusées chimiques. Le SOTV (l'acronyme de *Solar Orbit Transfer Vehicle*, soit «véhicule de transfert orbital solaire») utilisera un miroir très léger qui dirigera la lumière solaire sur un bloc de graphite dont la température atteindra 2 100 degrés. À cette température, le graphite se vaporise et stocké à bord se vaporisera ; le gaz occupant plus de volume que le liquide, une poussée sera créée par son éjection. Trois à huit semaines seront nécessaires pour monter une charge utile sur l'orbite géostationnaire, mais les économies se chiffrent par dizaines de millions de francs pour chaque lancement.

Au-delà de Jupiter, l'énergie solaire est plus diffuse, donc plus difficile à exploiter. La sonde *Galileo*, qui

Les voiles photoniques

Henry Harris

Depuis que les astronomes ont découvert que notre Galaxie contient de nombreuses planètes, les rêves des auteurs de science-fiction semblent plus réalistes. L'étude de ces planètes lointaines pourrait nous en apprendre davantage sur notre place dans l'Univers. Cette perspective conduit les ingénieurs à tourner leur regard vers les étoiles.

L'exploration de ces mondes n'est pas pour demain : avec les moyens techniques actuels, il faudrait des dizaines de milliers d'années pour atteindre les étoiles les plus proches. En 1998, j'ai coordonné pour la NASA une étude des systèmes de propulsion qui permettraient à un véhicule d'exploration de faire l'aller-retour vers une autre étoile en 40 ans, soit la durée d'une carrière pour un scientifique. Trois systèmes semblent envisageables : la fusion (voir l'encadré de la page 50), l'antimatière et la pression de radiation. Aujourd'hui, seul le dernier phénomène est suffisamment bien connu pour qu'on puisse en tester les potentialités.

L'attrait de la pression de radiation est évident : lorsque vous prenez votre voiture pour un long trajet, vous êtes tributaire de la présence de stations-service pour le ravitaillement en carburant et de mécaniciens qui la ramènent en état. En revanche, les véhicules spatiaux actuels doivent emporter tout le carburant dont ils auront besoin et fonctionner sans intervention humaine. Ne pourrait-on pas laisser le moteur et le carburant sur la Terre? On pourrait alors procéder à des réparations au cours des vols et alléger le véhicule, de sorte qu'il serait accéléré plus.

Dans les années 1980, les ingénieurs en aéronautique ont proposé de pousser des vaisseaux pour les vols de longue durée avec un puissant faisceau laser. Une surface importante de voile permet à cette dernière de recevoir une quantité d'énergie considérable. D'autres rayonnements sont envisageables : les micro-ondes sont évoqués par Erik Myrberg (voir l'encadré de la page 44), mais on pourrait aussi utiliser des particules chargées qui, atteignant le vaisseau, traverseraient une boucle magnétique supraconductrice, créant ainsi une force électromagnétique qui produirait une poussée. À ce jour, la lumière laser semble être encore la plus efficace.

Lorsqu'un photon émis par un laser atteint la voile, deux phénomènes peuvent se produire. Soit il entre en collision élastique avec le champ électromagnétique qui entoure les atomes de la voile, et il est alors réfléchi ; soit il est absorbé par le matériau de la voile, ce qui échauffe légèrement la voile. Dans les deux cas, la voile est accélérée, mais l'accélération qui résulte de la réflexion est deux fois supérieure à celle qui résulte de l'absorption.

L'accélération due à un laser est proportionnelle à la force qu'il transmet à la voile et inversement proportionnelle à la masse du véhicule spatial. Comme pour d'autres méthodes de propulsion, les performances des voiles photoniques sont limitées par les propriétés thermiques et par la résistance des matériaux, ainsi que par notre capacité à concevoir des structures légères. Les voiles proposées seraient un mince film métallique poli, tendu sur une structure de soutien qui conférerait une résistance structurale à l'ensemble.

La puissance transmise est limitée par le chauffage de la voile : lorsque sa température augmente, la surface métallique devient moins réfléchissante. Pour refroidir la voile et augmenter ainsi l'accélération, on recouvrirait la face non réfléchissante de matériaux qui dissiperaient efficacement la chaleur.

Pour atteindre des vitesses très élevées, un véhicule spatial devrait accélérer longtemps. La vitesse finale qu'une voile photonique peut atteindre est déterminée par la durée pendant laquelle un laser au sol peut l'éclairer efficacement. La lumière laser est cohérente : l'énergie transmise est constante quelle que soit la distance, dans la limite d'une distance critique nommée distance de diffraction. Au-delà, la puissance transmise devient rapidement négligeable.



La distance de diffraction d'un laser, et donc la vitesse maximale du véhicule qu'il propulse, dépendent de la puissance des lasers. Les très puissants consisteraient probablement en une batterie de plusieurs centaines de petits lasers. L'ouverture requise pour une telle batterie est presque égale au diamètre de la totalité de la batterie de lasers. La puissance maximale est transmise lorsque les lasers forment un ensemble le plus serré possible. Nous avons conçu un arrangement en mosaïque d'une densité voisine de 100 pour cent.

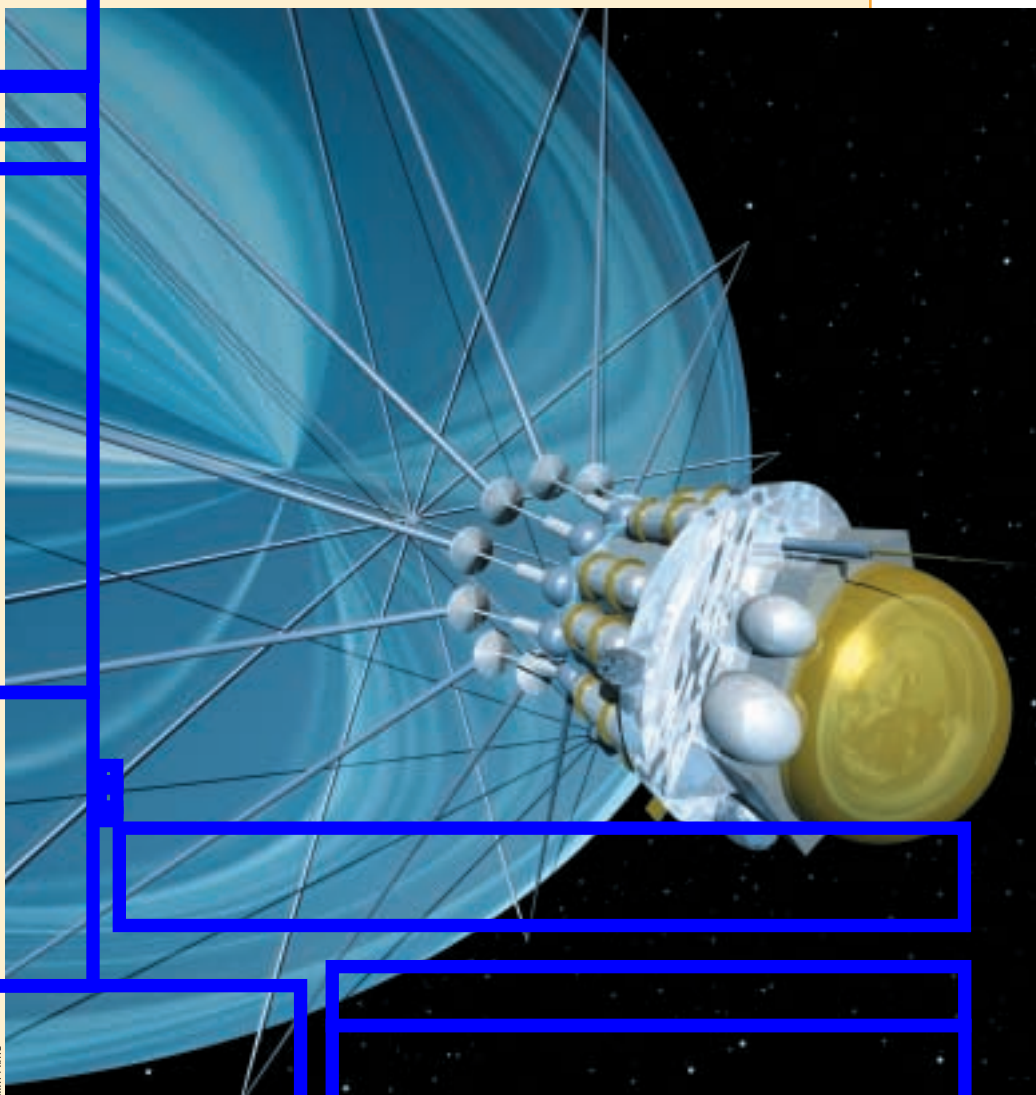
Au Laboratoire de propulsion spatiale de Pasadena, nous avons étudié les compromis techniques pour le coût des missions entre la puissance de lasers individuels et la taille d'une batterie de lasers. L'ouverture requise pour une mission interstellaire est énorme. Pour envoyer une sonde en 40 ans vers l'étoile proche Alpha du Centaure, la batterie de lasers devrait avoir un diamètre de 1 000 kilomètres. Heureusement, les missions dans le Système solaire requièrent des ouvertures moindres. L'envoi d'une charge utile de dix kilogrammes vers Mars en dix jours nécessite une ouverture de 15 mètres avec un laser de 46 gigawatts qui éclairerait une voile de 50 mètres de diamètre recouverte d'or. Avec ce mécanisme, on pourrait envoyer une sonde jusqu'à la frontière entre le vent solaire et le milieu interstellaire, aux confins du Système solaire, en trois ou quatre ans.

Un véhicule spatial à voile photonique suivrait automatiquement un faisceau, de sorte qu'on pourrait le diriger de la Terre. On peut même construire une voile avec un anneau externe réfléchissant qui se détacherait une fois la destination atteinte. L'anneau continuerait sa route, réfléchissant la lumière laser vers la partie centrale, séparée de la voile, la propulsant ainsi sur le trajet de retour vers la Terre.

Une grande partie du travail sur les voiles photoniques a déjà été réalisée. Le ministère américain de la Défense a mis au point des lasers de haute puissance et des systèmes de pointage de précision dans le cadre de sa recherche sur les missiles balistiques et sur les armements antisatellites. Des satellites qui réfléchissent la lumière solaire ont déjà été testés. Les Russes ont fait voler un réflecteur solaire tournant, en polymère, de 20 mètres de diamètre, *Znamya 2*, dans le cadre d'un projet d'éclairage hivernal d'appoint des villes du Nord de la Russie.

Aux États-Unis, l'Agence américaine pour l'océan et l'atmosphère prévoit de lancer dans les quatre ans à venir un véhicule spatial propulsé par une voile solaire. L'engin tournerait sur une orbite instable entre la Terre et le Soleil, d'où il détecterait les particules émanant de tempêtes solaires, une heure avant qu'elles n'atteignent la Terre.

La NASA évalue des projets de voiles photoniques comme d'éventuelles solutions de remplacement à faible coût des fusées classiques. Les missions envisagées vont de la démonstration d'une voile de



UN VÉHICULE SPATIAL À VOILE PHOTONIQUE (à gauche), poussé de la Terre par un laser, pourrait un jour transporter des sondes vers des destinations lointaines du Système solaire, voire vers d'autres étoiles. L'accélération serait due à la pression de radiation. De telles voiles seraient liées à des charges utiles légères (ci-dessus).

100 mètres de diamètre en orbite terrestre à un voyage à travers l'onde de choc aux confins du Système solaire.

Pour le moment, on teste les propriétés de matériaux susceptibles de constituer des voiles à laser pour des missions vers Mars, la ceinture de Kipper et même interstellaire. Au Nouveau-Mexique, un laser chimique militaire, d'une puissance de l'ordre de un mégawatt, testera les accélérations résultantes sur des voiles déployées à partir d'un véhicule spatial. D'ici à cinq ans, des lasers délivrant une puissance de un mégawatt pourraient propulser des voiles photoniques d'une orbite à une autre. De tels lasers assureraient la propulsion de missions scientifiques vers la Lune au cours de la prochaine décennie.

Si les voiles photoniques font naviguer dans le Système solaire, on envisagera ensuite leur utilisation pour des voyages vers des étoiles lointaines.

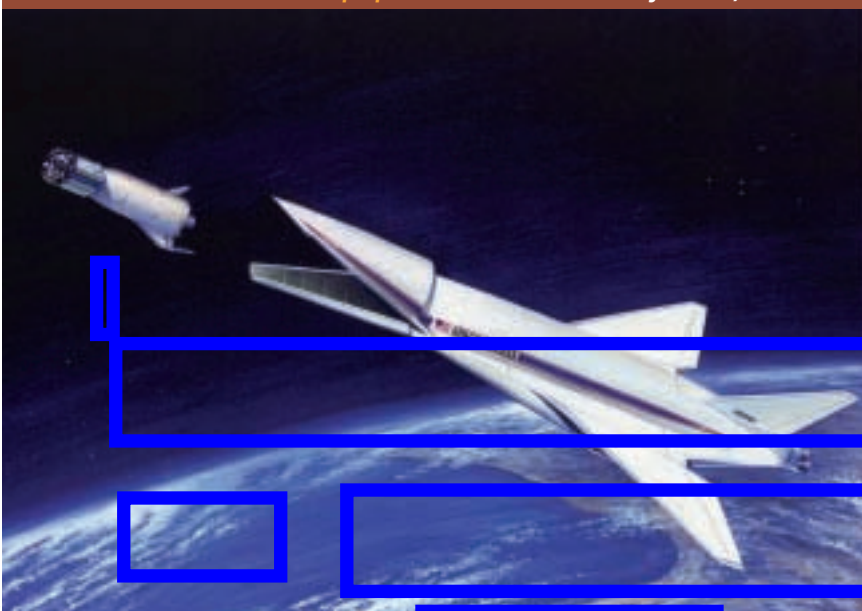
Henry HARRIS étudie l'exploration interstellaire au Laboratoire de propulsion spatiale de Pasadena (Californie).

Space Access

Date de lancement prévue : 2003

Estimation du coût : 25 à 40 milliards de francs

Source de propulsion : statoréacteurs à éjecteurs, fusées



Space Access

4. CET AVION SPATIAL LOURD est en cours de mise au point par la société Space Access. Grâce à d'innovants statoréacteurs à éjecteurs, ce véhicule atteindra Mach 6 (six fois la vitesse du son, soit 7 000 kilomètres par heure), avant de mettre à feu ses moteurs fusées. Les étages séparés atterriront sur la piste de lancement.

Fusée Kistler réutilisable

Date de lancement prévue : 1999

Estimation du coût : non révélé

Source de propulsion : fusée au kérosène et à l'oxygène liquide



Kistler Aerospace

5. LE PREMIER VAISSEAU SPATIAL ENTIÈREMENT RÉUTILISABLE sera l'engin K-1 de la Société Kistler Aerospace. Il devrait voler à la fin de 1999. Cette fusée à deux étages utilise des moteurs russes qui fonctionnent au kérosène et à l'oxygène liquide. Les étages séparés retourneront sur Terre par parachute.

a atteint les environs de Jupiter en 1995, et la sonde *Cassini-Huygens*, en route vers Saturne, ont toutes deux des générateurs nucléaires qui utilisent la chaleur de la désintégration de plutonium 238 pour engendrer de petites quantités d'électricité. Toutefois, il serait trop dangereux d'envoyer dans l'espace des systèmes nucléaires plus gros, car un accident au lancement serait catastrophique.

Comment résoudre la difficulté ? Les réacteurs nucléaires produisant des déchets radioactifs, les promoteurs de l'énergie nucléaire ont

envisagé de les lancer à l'état inactif, à l'aide de fusées classiques, et de les activer à distance de la Terre. Un voyage vers Mars ne durerait que 100 jours à l'aide d'un moteur nucléaire, contre 200 jours pour une fusée chimique. Un réacteur pourrait également fournir de l'énergie pour une base installée sur Mars.

Les réacteurs nucléaires assurent la propulsion des fusées de diverses manières, par exemple en fournissant une poussée directe et intense pendant un court instant (voir l'encadré de la page 48). Une fusée nucléaire pourrait aussi produire de la chaleur qui serait ensuite transformée en électricité, laquelle alimenterait des moteurs ioniques, ou propulserait à effet Hall ou un nouveau type de propulseur électrique nommé propulseur magnétoplasmodynamique. Toutefois, les réticences du public limitent les études de ce type.

Poussée par de l'énergie rayonnée

Si les réacteurs nucléaires étaient rejetés, bien d'autres solutions subsisteraient. Parmi elles, on peut citer les catapultes imaginées par les ingénieurs de la NASA, les catapultes à lévitation magnétique, où les fusées seraient en sustentation au-dessus d'une piste comme le train allemand *Maglev* ; ces catapultes construites sur le flanc d'une montagne accéléreraient une fusée qui quitterait la Terre pour s'élever dans le ciel sous l'impulsion de la gravité, à la vitesse du son.

Des véhicules pourraient également être propulsés par des micro-ondes (voir l'encadré de la page 44) : une poussée serait assurée par un effet magnétohydrodynamique, créé lorsqu'un fluide ou un gaz conducteur traverse des champs électriques et magnétiques croisés. Avec de tels systèmes, les

Les fusées nucléaires

James Powell

Un jour, on ne se contentera plus d'envoyer des sondes qui survolent rapidement les planètes externes du Système solaire : on voudra les visiter à l'aide de véhicules spatiaux capables de se mettre en orbite autour d'elles, de faire descendre des robots sur leurs lunes et, même, d'en rapporter des échantillons de roches. On voudra envoyer des astronautes vers leurs fascinants satellites, dont on pense que certains contiennent en abondance de l'eau liquide, condition fondamentale pour héberger la vie telle que nous la connaissons.

Pour de telles missions, la fission nucléaire semble mieux adaptée que la combustion chimique. Les fusées chimiques sont utiles, mais leur rendement relativement faible d'énergie qu'elles fournissent pour une masse donnée de carburant est limitant. Avec la propulsion chimique, seul un vaisseau spatial léger qui utilise plusieurs « assistances » gravitationnelles de planètes peut atteindre les planètes lointaines. Pour profiter de ces manœuvres gravitationnelles à l'appoint, les concepteurs de missions doivent attendre des « fenêtres » de lancement, de courtes périodes durant lesquelles on peut lancer un engin spatial vers des planètes positionnées de telle façon qu'elles accélèrent sa course de proche en proche vers des corps célestes éloignés.

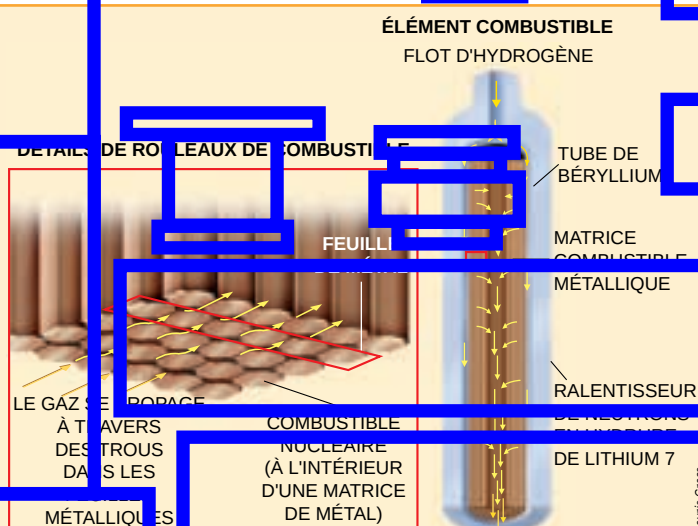
Les vitesses d'éjection des gaz de combustion ne sont pas suffisantes pour accélérer suffisamment les fusées. Les meilleures fusées chimiques, où l'on utilise la réaction entre l'hydrogène et l'oxygène, accélèrent des vaisseaux qui quittent l'orbite terrestre à dix kilomètres par seconde au maximum.

En revanche, des fusées nucléaires communiqueraient des accélérations de 22 kilomètres par seconde. On atteindrait Saturne en trois ans seulement au lieu de sept, et sans assistance gravitationnelle. Les fusées nucléaires seraient sûres et propres : une fusée nucléaire n'a pas besoin d'être très radioactive au moment du lancement. Le véhicule spatial, avec ses réacteurs nucléaires, serait lancé par une fusée chimique classique. Une fois la charge élevée à environ 800 kilomètres d'altitude, on mettrait le réacteur nucléaire en route.

La construction d'un moteur de fusée à fission nucléaire est envisageable : avec mes collègues, nous avons dessiné un moteur de fusée nucléaire compact qui pourrait être construit dans six ou sept ans, pour un coût de 3,5 à 5 milliards de francs. Les coûts de mise au point du moteur seraient compensés par les économies réalisées sur les futurs coûts de lancement, car un véhicule spatial nucléaire n'a pas besoin d'emporter une masse importante de propergols chimiques, de sorte qu'on pourrait utiliser de petits lanceurs, tel qu'*Ariane 4*.

Les fusées nucléaires ne sont pas des nouveautés. À la fin des années 1980, on a envisagé la mise en route d'un réacteur à fission thermique nucléaire spatial. Son objectif était la mise au point d'un moteur nucléaire léger et compact, pour des applications de défense ou d'exploration spatiale. Le projet était d'envoyer un véhicule spatial à une altitude terrestre haute. La pierre angulaire de ce projet était un réacteur à fission de particules, où le combustible consistait en de petites particules de carbure d'uranium tassées, recouvertes de carbure de zirconium. Les travaux sur ce réacteur avortèrent avant la construction d'un modèle de vol, mais les ingénieurs avaient montré, sur un modèle de faible puissance que le concept était réalisable.

Dans notre projet, le combustible nucléaire du réacteur serait sous la forme de feuilles métalliques perforées, enroulées comme dans un roulé à la confiture, avec un centre creux (voir la



DANS UN MOTEUR NUCLÉAIRE COMPACT, 37 cellules chaufferaient de l'hydrogène. Circulant dans l'élément, ce dernier se vaporiserait entre les rouleaux de combustible nucléaire (en marron clair). Cinq des feuilles de la matrice métallique du rouleau sont représentées en détail à gauche. Le gaz chauffé s'engouffrerait ensuite dans un canal central et sortirait en bas de l'élément créant la poussée.

figure ci-dessus). Une enveloppe d'hydrure de lithium 7 entourerait le rouleau de combustible et ralentirait les neutrons émis par la fission nucléaire qui se produirait au sein du combustible. Le réfrigérant (l'hydrogène liquide) s'écoulerait de l'extérieur du rouleau vers l'intérieur, se vaporisant rapidement à mesure qu'il s'échauffait et qu'il coulerait vers le centre. Le gaz chauffé à environ 2 700 degrés passerait à grande vitesse dans un canal le long de l'axe central du rouleau et serait éjecté par une petite tuyère.

Un tel système profiterait de la présence d'hydrogène dans le Système solaire. Ainsi, comme le combustible nucléaire dure longtemps, un véhicule propulsé à l'énergie nucléaire pourrait en théorie faire le tour du Système solaire en 10 ou 15 ans, en se réapprovisionnant en hydrogène si nécessaire. Un vaisseau spatial pourrait évoluer durant des mois dans les atmosphères de Jupiter, de Saturne, d'Uranus ou de Neptune, recueillant des données détaillées sur leur composition ou sur leur climat. Un véhicule pourrait également visiter Europe, Pluton ou Titan en recueillant des échantillons de roches, et il referait le plein d'hydrogène en hydrolysant l'eau de la glace fondue.

Son réacteur n'étant mis en route que loin de la Terre, un véhicule spatial nucléaire serait plus sûr que certaines sondes d'exploration de l'espace lointain, équipées de propulseurs chimiques. Aux confins du Système solaire, les rayons du Soleil sont trop faibles pour fournir l'énergie électrique nécessaire aux instruments des engins spatiaux. C'est pourquoi ils fonctionnent en général au plutonium 238, qui est extrêmement radioactif même lors du lancement. En revanche, sur une sonde à propulseurs nucléaires, les instruments seraient alimentés par le réacteur qui fournit la poussée. En outre, la quantité de déchets radioactifs produits serait négligeable (à l'ordre de un gramme pour une mission dans l'espace lointain).

Avec uniquement des fusées chimiques, notre capacité d'exploration des planètes externes et de leurs satellites est limitée. Dans le futur proche, seules des fusées nucléaires pourront nous fournir la puissance, la fiabilité et la souplesse nécessaires pour élargir notre connaissance des confins du Système solaire.

James POWELL est président de la Société
P l u s

Vers les étoiles

Stephanie Lefebvre

L'idée de voyage vers les étoiles était déjà évoquée par les poètes romains mais elle a toujours correspondu à une sorte de course à l'impossible. Bien que le voyage interstellaire reste un merveilleux rêve futuriste, un petit groupe d'ingénieurs et de scientifiques analyse théoriquement et expérimentalement des techniques capables de propulser des vaisseaux spatiaux à des vitesses suffisamment élevées pour s'échapper de notre Système solaire. Un système de propulsion fondé sur la fusion nucléaire pourrait emmener des hommes vers les planètes externes et envoyer des engins spatiaux automatiques à des milliers d'unités astronomiques dans l'espace interstellaire (une unité astronomique, égale à 150 millions de kilomètres, est la distance moyenne entre la Terre et le Soleil). Un tel système pourrait voir le jour dans les décennies à venir. Des moteurs encore plus puissants, proposés par annihilation de matière et d'antimatière, pourraient emmener des astronefs vers des étoiles voisines.

L'attrait de ces modes de propulsion exotiques réside dans la quantité fantastique d'énergie produite à partir d'une masse donnée de combustible. Un système de propulsion fondé sur la fusion nucléaire, par exemple, fournirait environ 100 milliards de joules par gramme de combustible, soit dix millions de fois plus qu'avec des réactions chimiques. Les réactions matière-antimatière seraient plus difficiles à exploiter, mais elles engendreraient 20 000 milliards de joules à partir d'un seul gramme de combustible !

Dans la fusion nucléaire, des atomes légers fusionnent en atomes plus lourds, lorsque la température et la pression sont suffisantes

pour les rapprocher durant un temps assez long. La différence de masse (Δm) entre la somme des masses des deux atomes légers et la masse de l'atome fusionné correspond à l'énergie libérée (E) suivant la célèbre formule $E = \Delta mc^2$ (c est la vitesse de la lumière).

On explore la fusion contrôlée de deux façons, selon la technique utilisée pour confiner le gaz extrêmement chaud, le plasma, au sein duquel a lieu la fusion. Dans la fusion par confinement magnétique, de puissants champs magnétiques confinent le plasma. En revanche, la fusion par confinement inertiel est fondée sur des faisceaux lasers ou d'ions, dont le rayonnement chauffe et comprime de minuscules billes de combustible fusible.

En novembre 1997, des physiciens qui étudient le confinement magnétique ont produit une réaction de fusion dont l'énergie était égale à 65 pour cent de l'énergie fournie pour amorcer la réaction. La réaction eut lieu en Angleterre, dans le tokamak euro-

peen, où une enceinte toroïdale où le plasma est confiné par des champs magnétiques. La fusion ne sera utilisée pour la production d'énergie que si l'on parvient à produire plus d'énergie qu'il en faut pour amorcer ou entretenir la réaction, mais, même si on l'obtient, sur la Terre, il y aura plusieurs problèmes spécifiques à résoudre pour le développement de fusées à fusion. Notamment, on devra canaliser les particules chargées, très énergiques, créées par la réaction. En outre, on devra apprendre à stocker suffisamment de combustible et à régler la libération de l'énergie produite.

DANS UN VAISSEAU SPATIAL À ANTIMATIÈRE, la charge utile serait située loin de la zone de production de l'énergie. L'anneau à l'arrière du vaisseau est une partie de la tuyère magnétique qui orienterait les particules chargées pour obtenir la poussée.



La fusée à fusion est évoquée depuis la fin des années 1950. Bien que la fusion produise d'énormes quantités de particules très énergétiques, la réaction n'accélérerait un vaisseau spatial que si ces particules sont dirigées de façon à produire une poussée. Dans les systèmes à fusion par confinement magnétique, on alimenterait la réaction en combustible pour l'entretenir, tout en permettant à une partie du plasma de s'échapper par une tuyère. Comme le plasma détruirait toute paroi matérielle rencontrée, la tuyère devrait être magnétique : de puissants champs magnétiques dirigeraient les particules chargées vers la sortie de la fusée.



Dans : Barry et Robert O'Dell

UN VAISSEAU SPATIAL INTERSTELLAIRE IMITERAIT SURTOUT une structure tournante à l'avant, pour imiter la gravité à l'intérieur de quatre compartiments.

adaptables à la propulsion des fusées. En 1996, plusieurs pays ont financé les recherches sur des techniques de confinement magnétique prometteuses comme les strictions à champ toroïdal inversé, la configuration à inversion de champ et le tokamak sphérique.

En attendant, les physiciens étudient les tuyères magnétiques. Des physiciens de l'Université de l'Ohio et du Laboratoire de Los Alamos utilisent des cou-

chauds, et ils étudient les interactions de ce dernier avec le champ magnétique. Même le problème de la quantité de combustible fusible peut être résolu.

Dans un moteur fondé sur la fusion par confinement inertiel, de puissants lasers ou des faisceaux d'ions fusionneraient de minuscules billes de combustible à une cadence de 30 microbilles par seconde. Une tuyère magnétique suffirait également pour évacuer le plasma, créant ainsi la poussée.

Les particules créées par fusion dépendent des combustibles utilisés. La réaction la plus facile à amorcer est celle entre le deutérium et le tritium, deux isotopes lourds de l'hydrogène dont les noyaux atomiques comprennent un proton et, respectivement, un et deux neutrons. La réaction libère des protons et des particules alpha, c'est-à-dire des noyaux d'hélium, composés de deux protons et de deux neutrons. Les particules alpha communiqueraient une poussée (on peut les diriger à l'aide de champs électriques ou magnétiques, parce qu'ils sont électriquement chargés), mais les neutrons (neutres) sont indésirables parce qu'on ne peut les diriger. Leur énergie cinétique peut être exploitée pour la propulsion, mais pas directement : on pourrait les bloquer dans un matériau et utiliser la chaleur qui résulte de leur capture. Enfin les neutrons menaceraient l'équipage humain, de sorte que les fusées emportant un équipage seraient alourdies par des protections.

Ainsi, même que la fusion entre deutérium et tritium soit a priori la plus facile à réaliser, il serait préférable d'utiliser du deutérium et l'isotope 3 de l'hélium (deux protons et un neutron). La fusion de ces noyaux produit une particule alpha et un proton, tous deux manipulables par des champs magnétiques. Cependant, l'hélium 3 est extrêmement rare sur la Terre, et la réaction entre le deutérium et l'hélium 3 est plus difficile à amorcer que la réaction entre le deutérium et le tritium. Dans tous les cas, seul un vaisseau spatial de plusieurs milliers de tonnes (la majeure partie étant du combustible) pourrait conduire des hommes jusqu'aux confins du système solaire ou dans l'espace interstellaire (pour comparaison la Station spatiale internationale aura une masse de 500 tonnes environ).

Chacune des difficultés évoquées semble rédhibitoire, mais, pour chacune, des solutions semblent en vue. Tout d'abord, la réaction de fusion dépassera de loin le seuil de rentabilité à partir duquel un réacteur produit autant d'énergie qu'on lui en fournit. Les études du confinement inertiel progressent rapidement. En 2003, avec un laser dont la puissance atteindra près de deux millions de joules pendant quatre milliardièmes de seconde, les physiciens espèrent libérer jusqu'à dix fois la quantité d'énergie nécessaire pour amorcer la réaction de fusion.

Par ailleurs, plusieurs éléments indiquent que le tokamak, qui a dominé la recherche sur la fusion par confinement magnétique, sera un jour supplanté par des techniques plus compactes et plus

Bien qu'il y ait très peu d'hélium 3 sur Terre, il en existe de grandes quantités dans le sol lunaire ou dans l'atmosphère de Jupiter. En outre, d'autres éléments présents sur la Terre, comme le bore, peuvent servir dans des réactions de fusion qui produisent des particules alpha.

L'annihilation de matière et d'antimatière libérerait encore plus d'énergie par unité de masse que la fusion. Un système de propulsion spatiale fondé sur ce principe exploiterait l'annihilation de protons et d'antiprotons.

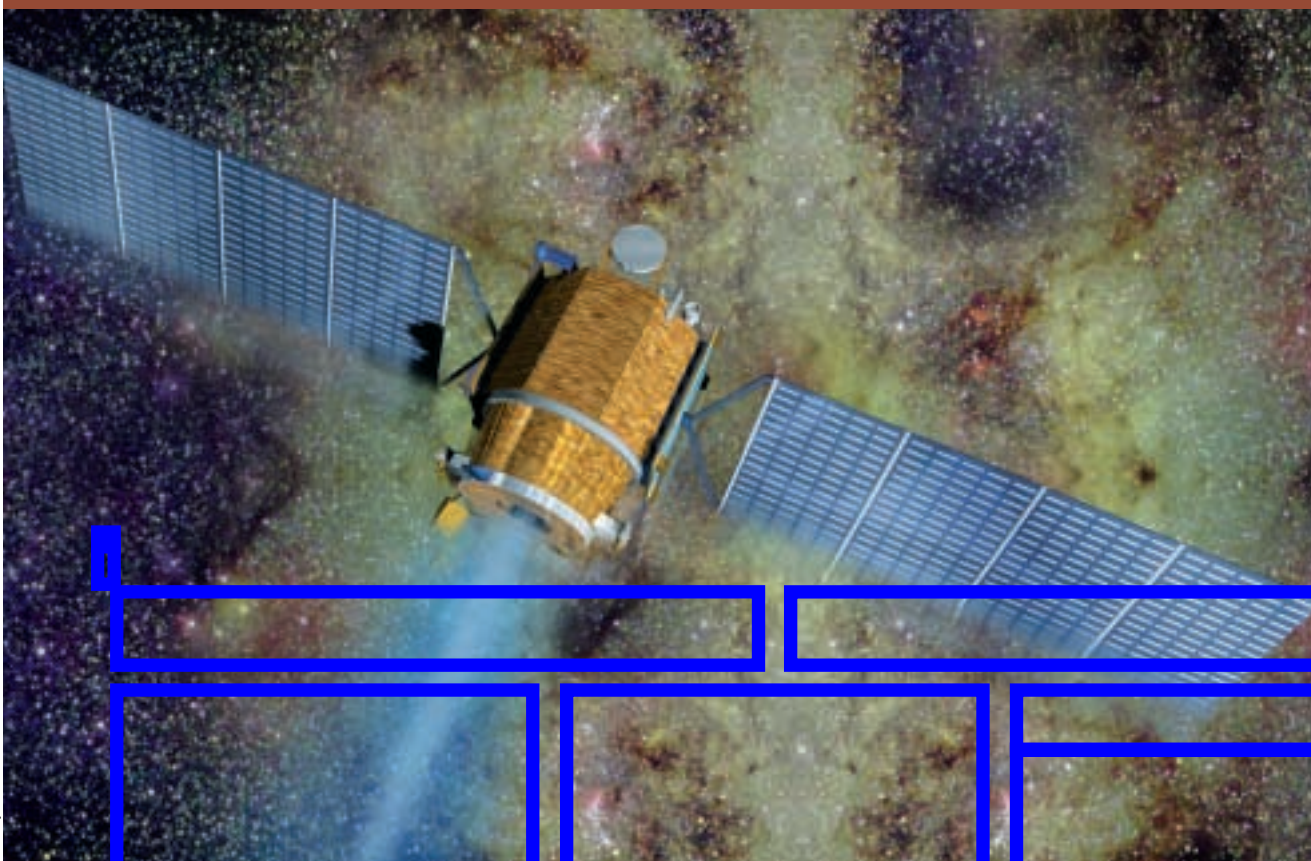
Cette annihilation conduit à une succession de réactions. La première d'entre elles est la production de pions, des particules de courte durée de vie, dont certaines peuvent être canalisées par des champs magnétiques. Les pions qui résultent de l'annihilation matière-antimatière se déplacent à des vitesses proches de celle de la lumière.

Où trouver les antiprotons, alors que les accélérateurs de particules de haute énergie du monde entier n'en produisent que quelques dizaines de nanogrammes par an ? Pour transporter des missions habitées vers Alpha du Centaure, un système de propulsion par annihilation de matière et d'antimatière nécessiterait des tonnes d'antiprotons. Le piégeage, le stockage et la manipulation des antiprotons restent une difficulté majeure, car ces particules s'annihilent au contact de protons de la matière ordinaire.

Néanmoins, on pourrait exploiter une partie seulement de l'énorme quantité d'énergie contenue dans l'antimatière, tout en produisant que de petites quantités d'antiprotons, quantités qui seront probablement disponibles dans le courant de la prochaine décennie. Ce système utiliserait des antiprotons pour déclencher une fusion initiale par confinement inertiel. Les antiprotons pénétreraient dans les noyaux d'atomes lourds, s'annihileraient avec des protons et déclencheraient la fission des noyaux lourds. Les fragments énergétiques obtenus par fission chaufferaient le combustible fusible et amorceraient la réaction de fusion. L'étude de la faisabilité d'un tel système de propulsion est en cours.

Au premier abord, les défis techniques de la construction de systèmes de propulsion à fusion, sans parler de l'antimatière, paraissent insurmontables. Cependant, l'humanité a déjà réalisé des exploits aussi extraordinaires. Le programme Apollo a montré ce que l'on peut accomplir lorsqu'on mobilise des efforts et les moyens. Avec la propulsion par fusion et par annihilation de matière et d'antimatière, l'enjeu serait considérable : c'est l'accès aux étoiles.

Stephanie LEIFER travaille au Laboratoire de propulsion spatiale de Pasadena (Californie).



Don Foley

6. LE MOTEUR IONIQUE vole déjà sur la sonde *Deep Space 1*, lancée en octobre 1998 (cette sonde doit approcher une comète). Des panneaux solaires produisent de l'électricité qui accélère

des atomes chargés de xénon. Le moteur fonctionne des semaines durant, d'où des vitesses finales élevées, malgré des poussées extrêmement faibles (l'équivalent du souffle humain).

engins ne seraient pas alourdis par le carburant ni par le comburant. Les véhicules propulsés par des faisceaux d'onde électromagnétique pourraient être alimentés par un réseau de stations orbitales fonctionnant à l'énergie solaire.

Du plus compliqué au plus simple : des équipes ont envisagé de propulser les engins par des câbles conducteurs. Pour rester en orbite, des objets plus éloignés du centre de la Terre doivent conserver une vitesse horizontale légèrement inférieure à celle d'objets plus proches. Ainsi, lorsque des objets se trouvant à différentes altitudes sont reliés par un câble de quelques centaines de mètres, les forces centrifuges maintiennent le câble tendu.

D'autres principes physiques, notamment la conservation du moment cinétique, peuvent alors s'exercer sur les objets captifs, de sorte qu'un câble peut être utilisé comme un lance-pierres géant pour transférer efficacement de l'énergie entre des charges utiles et modifier ainsi rapidement l'orbite des

satellites. En utilisant des câbles conducteurs, on peut même engendrer ainsi de l'électricité. On envisage même de relier la Terre à un satellite en orbite géostationnaire par un câble attaché en un point de l'équateur. Des systèmes élévateurs pourraient alors monter le long du câble des objets à n'importe quelle altitude de jusqu'à 36 000 kilomètres, en dépensant très peu d'énergie.

Au point où l'on envisage de construire des câbles résistants aux tensions qui s'exerceraient sur un tel câble, mais des fullerènes tubulaires, c'est-à-dire des molécules composées d'atomes de carbone se reliant en tubes de quelques nanomètres de diamètre, pourraient constituer des câbles 600 fois plus résistants que les câbles métalliques actuels.

Enfin, certains étudient le voyage vers d'autres étoiles. L'approche la plus prometteuse semble être les voiles solaires (voir l'encadré de la page 46), mais des équipes envisagent aussi des réac-

teurs à fusion nucléaire (voir l'encadré de la page 47).

Dans la même veine futuriste, les idées sont nombreuses : la téléportation quantique, l'utilisation des trous de ver dans l'espace-temps, la suppression du moment cinétique... La mise en œuvre de ces idées nécessiterait toutefois une conception entièrement nouvelle de la physique, mais qui oserait dire qu'elles sont impraticables?

Geoffrey LANDIS, *Small Laser-propelled Interstellar Probe*, in *Journal of the British Interplanetary Society*, vol. 50, n° 4, pp. 149-150, 1997.

Tether in Space Handbook, sous la direction de M.L. Cosmo et E.C. Lorenzini, Smithsonian Astrophysical Observatory, décembre 1997.

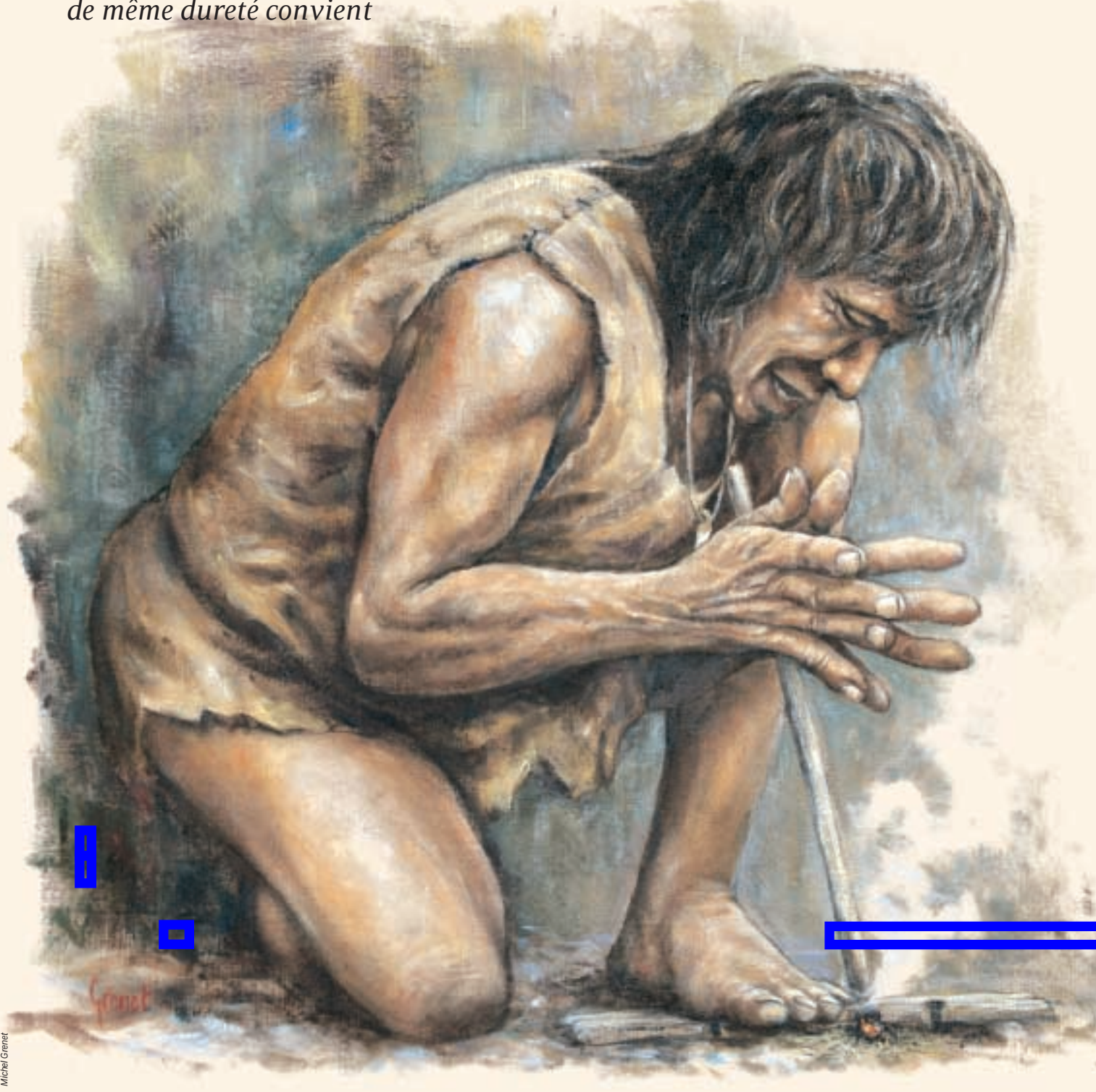
S.N.B. MURTHY et E.T. CURAN, *Scramjet Propulsion*, AIAA Education Series, 1999.

Des renseignements complémentaires sont disponibles sur notre site Internet : www.pourlascience.com

Le feu domestiqué

JACQUES COLLINA-GIRARD

Des expérimentations montrent que, contrairement aux idées reçues, deux silex ne peuvent allumer un feu, mais que la friction de deux bois de même dureté convient



Michel Grenet

Selon la mythologie grecque, le titan Prométhée a dérobé le feu aux dieux pour le donner aux hommes. Pour ce forfait, il a été enchaîné sur une montagne du Caucase et, chaque jour, un aigle venait lui dévorer le foie. Une autre légende indique qu'Hermès, après avoir enlevé le troupeau de vaches d'Apollon, a été le premier à allumer un feu en frottant deux morceaux de bois, l'un de laurier, l'autre de grenadier. Ces deux mythes, associant vol et feu, illustrent l'importance et le caractère sacré du feu dans l'imaginaire. La production du feu a exercé une fascination irrationnelle et générale, probablement dès les premiers temps de l'humanité. Sans doute est-ce là une voie de recherche psychologique pour comprendre de l'intérieur la maîtrise du feu et sa production, comme l'ont déjà esquissé Sigmund Freud, puis Gaston Bachelard.

Le passé, à l'égard des techniques récentes, nous nous contenterons de traverser les champs de la préhistoire, de l'histoire, de l'histoire des techniques et de l'ethnographie pour dresser un bilan de nos connaissances sur l'obtention du feu. Comment et quand l'homme a-t-il domestiqué le feu ? Quand et comment l'a-t-il produit lui-même ?

Les plus anciens foyers

La plupart des préhistoriens, s'appuyant sur les foyers bien attestés de quelques sites bien datés, pensent que le feu est utilisé depuis 400 000 ou 500 000 ans. En Europe, la grotte de Menez-Drégar, dans la vallée de la Durance, recelait, parmi une faune archaïque et quelques éclats, des traces de cendre datant de 600 000 ans. À ce jour, ces vestiges témoignent des plus anciens feux européens. Par ailleurs, les silex brûlés trouvés sur le site de Terra Amata, près de Nice, ont été datés de 380 000 ans, et dans l'Hérault, la grotte de Lunel-Viel, occupée

il y a 450 000 ans, a livré d'indiscutables traces de foyers aménagés. De plus, Jean-Luc Monnier et Ramiro Javier March, de l'Université de Bordeaux, ont récemment mis au jour plusieurs foyers dont l'âge est échelonné entre 450 000 et 380 000 ans dans la grotte de Menez-Drégar en Bretagne (voir le dossier de *Pour la Science*, les origines de l'humanité, janvier 1999). En revanche, la grotte de Tucavil, dans les Pyrénées-Orientales, occupée il y a 400 000 ans, n'a livré aucun témoignage de feu.

La plupart des sites attribuables en Europe à un *Homo erectus* évolué prouvent une maîtrise du feu. Les archéologues y ont observé des restes de foyers, tels que des charbons, des couches de cendre, des pierres rougies et des ossements partiellement carbonisés. La structure des foyers retrouvés – cerclés de galets et installés dans une dépression du sol – dénotent une bonne connaissance des moyens d'améliorer la combustion et le tirage du feu.

Toutefois, nous ignorons encore si ces hommes allumaient eux-mêmes le feu, car aucun vestige d'outil à fabriquer le feu n'a été trouvé. D'après les préhistoriens, il y a environ 600 000 ans, l'homme a d'abord appris à conserver et à entretenir un feu sans savoir le fabriquer. Cette hypothèse du feu ramassé et conservé est illustrée par le roman *La guerre du feu* de Joseph-Henri Rosny, publié en 1911. Au XIX^e siècle, en Europe, la conservation du feu était encore pratiquée dans les villages, où l'on préférait emprunter un tison au voisin plutôt que les allumettes étaient chères. Les Indiens navigateurs de Patagonie transportaient dans leurs pirogues un foyer allumé sur un lit d'argile. Les textes classiques d'Hésiode (-525 ; -456) évoquent les bergers grecs véhiculant le feu grâce à la moelle d'une grande ombellifère. En outre, l'homme conservé intact avec



2. UN MORCEAU DE SILEX (dans la main droite) produit, en heurtant un fragment de marcasite (dans la main gauche) des étincelles qui embrasent un morceau d'amadou combustible.

son équipement, dans les glaces des Alpes jurassiennes, daté de 3 350 à 3 100 ans avant notre ère, avait un récipient en écorce de bouleau qui contenait des feuilles d'érable et quelques charbons : cette boîte aurait servi au transport de tisons.

Il y a 40 000 ans, l'homme a réussi à allumer le feu. Les principales techniques utilisées sont fondées sur deux principes physiques : les systèmes par percussion, par exemple de silex contre un silex, et ceux par friction de deux morceaux de bois. Ces pratiques ont rarement fait l'objet d'expérimentations. Celles que nous avons effectuées ont pourtant clarifié quelques points de leur usage.

Battre le briquet

Au début de ce siècle finissant, il subsistait, dans toutes les cuisines d'Europe, une boîte métallique qui contenait un briquet composé d'un silex ou d'une pierre à fusil (le mot «briquet» provient d'un mot hollandais qui signifie pierre à feu), des chiffons partiellement



1. LA FRICTION vigoureuse d'un foret en bois contre une planchette produit rapidement de la fumée, ainsi que de la sciure qui s'accumule dans l'encoche taillée. Un spécialiste entraîné obtient après



une ou deux minutes une braise rougeoyante dans la sciure fumante. Cette technique est utilisée par les hommes depuis au moins 10 000 ans tel que le montre la vue d'artiste de la page précédente.





3. UNE LIMB RECOURBÉE, dont l'acier riche en carbone est très dur, remplace avantageusement la marcassite dans un briquet à silex. Les étincelles embrasent un morceau d'amadou maintenu sur le silex (*flèche*).

carbonisés qui constituaient une étoupe et d'un morceau de fer recourbé à la manière d'un B, souvent forgé à partir d'une vieille lime dont l'acier trempé au carbone convenait parfaitement (voir la figure 5). Chaque matin, le membre de la famille préposé à l'allumage du feu coinçait solidement entre ses genoux la boîte au fond de laquelle étaient placés les chiffons dont la combustion parfaite favorisait l'embrasement. Puis, d'une main, il maintenait fortement la pierre à fusil et, de l'autre, saisissait le B métallique, qu'il frappait le plus près possible du chiffon.

Sur le métal produisaient des étincelles, dont l'une, après quelques tentatives infructueuses, se fixait sur les chiffons. Alors, il le soulevait et soufflait pour attiser la braise jusqu'à ce que le soufre dont était imprégnée une tige de chanvre puisse s'enflammer ; cet ancêtre de l'allumette allumait alors une chandelle.

Ces briquets sont de même nature que les briquets préhistoriques, le principe demeure identique : une particule d'acier ou de marcassite (sulfure de

fer) arrachée par le choc avec le silex brûle et tombe sur un produit inflammable. L'expérimentation montre que les briquets préhistoriques à marcassite produisent des étincelles plus efficaces que ceux à acier, car la marcassite brûle dans l'oxygène de l'air alors que l'acier n'est que porté à incandescence.

Ainsi, c'est la marcassite et la pyrite, une autre forme cristalline de sulfure de fer, les expérimentateurs ont constaté que la marcassite, moins dure que la pyrite, est préférable voire la seule utilisable.

En France, au Moyen Âge, l'étincelle était généralement reçue sur de l'étoupe. Toutefois, diverses substances inflammables sont utilisables, la plus traditionnelle étant l'amadou, qui est probablement utilisé depuis les premiers allumages de feu. L'amadou est un produit dérivé de l'amadouvier, un champignon

ligneux parasite des vieux troncs. Le cœur du champignon, sous une couche fibreuse et incombustible, est composé d'une substance orangée, ouatée, idéale pour recueillir des étincelles. Dans les campagnes, les amadours subissaient des traitements artisanaux parfaitement accessibles à l'homme préhistorique : ils que l'imprégnation par le rebuyage prolongée dans un mélange d'eau et de suie ou la macération dans l'eau riche en tanin

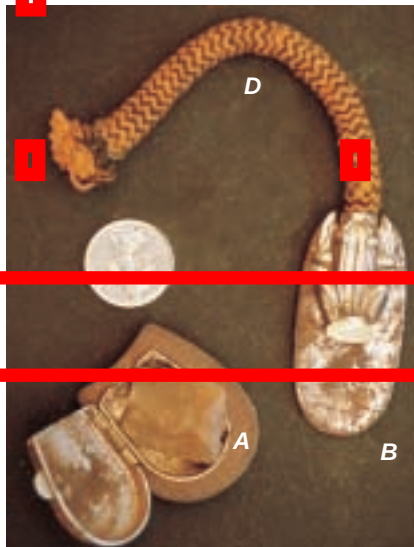
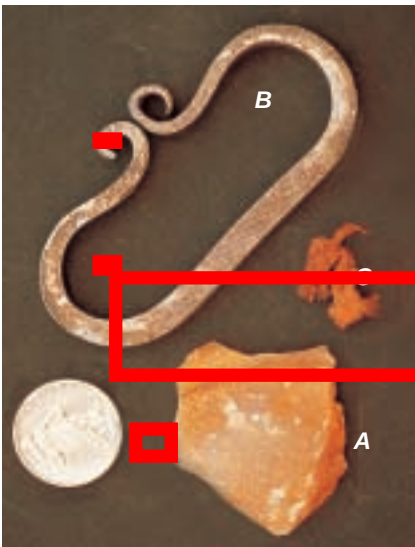
des vieux arbres. Ces opérations augmentent l'inflammabilité de l'amadou : elles ajoutent des produits plus combustibles tels que la graisse de mouton ou les particules de charbon de la suie, ou éliminent les impuretés organiques incombustibles.

À l'époque préhistorique, avant l'apparition du métal, on frappait le silex sur un morceau de marcassite, et non sur un autre silex, car le choc de deux silex ne produit qu'une étincelle froide et inefficace. Plus tendre que la pyrite, la marcassite se présente en nodules de diverses nuances verdâtres (voir la figure 4). Elle est fréquente dans certaines régions et, en particulier, dans les terrains crayeux du Nord de la France. Les étincelles produites par le choc du silex contre la marcassite (ou de la marcassite contre la marcassite) persistent longtemps et sont suffisamment chaudes pour une ignition.

Des briquets préhistoriques, composés de nodules de marcassite et de grattoirs en silex, prouvent que les hommes de la deuxième partie du Paléolithique supérieur européen, il y a entre 10 000 et 15 000 ans, connaissaient cette technique. Un nodule de marcassite, vieux de 13 000 ans et fortement rainuré par un usage prolongé, a été trouvé au Trou de Chaleux, en



4. Nodule de marcassite de huit centimètres de diamètre



5. LE BRIQUET en forme de B majuscule (à gauche) de nos expérimentations est fondé sur le même principe que le briquet (à droite) utilisé à la fin du siècle dernier où une mèche de coton nitrifié (D) remplaçait l'amadou (C). Dans les deux cas, de l'acier (B) est frappé avec une pierre à fusil (C).

Belgique : c'est le vestige du plus ancien briquet connu. Par ailleurs, de l'amadou a été découvert dans des sites mésolithiques (il y a environ 9 000 ans) proches de marécages ou de lacs, tel celui de Starr Carr, en Angleterre, et également dans des sites néolithiques (entre -7 000 et -3 000 ans).

Les plus anciens briquets métalliques datent de l'âge du fer et sont assez répandus à l'époque romaine et gallo-romaine. En Bulgarie, on en a retrouvé d'importantes séries, datant des IX^e et X^e siècles, dont la forme en «poing américain» a persisté jusqu'au XIX^e siècle.

Certains briquets asiatiques, tels les népalais ou les tibétains, sont des objets d'art incrustés d'argent et richement ornés de perles de corail et de turquoises. Dans ces modèles, la lame d'acier du briquet est fixée à une pochette en cuir qui contient la pierre à fusil et l'amadou.

Les briquets à silex, encore utilisés aujourd'hui dans certaines régions isolées d'Afrique ou d'Asie, servaient encore très récemment en Europe. Il y a une cinquantaine d'années, on les vendait sur les marchés de Grèce et de Bulgarie et, à la même époque ils faisaient partie de l'équipement des bergers isolés en montagne. Par ailleurs, cette technique était encore pratiquée par les Indiens de Patagonie, par percussion d'un éclat de quartzite contre un tubercule d'antilocaprine.

Le dos d'une lame de couteau en acier inoxydable frappé sur un éclat de silex peut constituer un briquet de fortune : c'était une des manières des paysans pauvres du Périgord du XX^e siècle pour allumer le feu. En France, ces objets de fortune ont disparu en une ou deux générations, depuis l'entre-deux-guerres.

Dans le Sahara, des haches polies récupérées sur les sites néolithiques servent occasionnellement de pierre à briquet (voir figure 6). En République démocratique du Congo, ils sont encore fabriqués avec de vieilles limes mises au rebut.

Des expériences ont montré que les meilleurs aciers – durs et fragiles – sont des aciers riches en carbone, ce qui explique l'ajout par les forgerons de matières organiques (corne ou urine), aux aciers des briquets.

Nous allons maintenant examiner maintenant l'autre manière d'allumer un feu : la friction de deux pièces de bois.

Le feu par friction

La rotation d'un foret vertical, ou drille, sur une planchette horizontale est le système le plus efficace pour utiliser le bois. Une petite encoche de la planchette, à l'endroit où s'appuie le foret, améliore l'efficacité de cette méthode, parce que la fumée produite par la friction est aérée et peut s'évacuer à mesure qu'elle brûle. La sciure embrasée peut ensuite enflammer des feuilles sèches ou d'autres produits végétaux inflammables.

Les préhistoriens ont longtemps cru que l'on n'obtenait du feu que si l'on frottait deux bois de duretés différentes. C'était une erreur : nos expérimentations

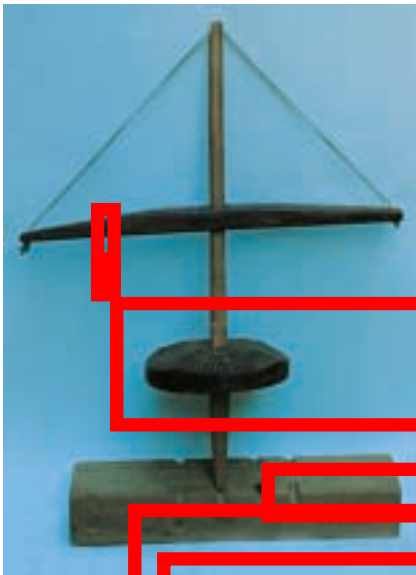
montrent que deux essences identiques fonctionnent tout aussi bien ; l'ignition s'obtient plus rapidement si les bois sont tendres. Les meilleurs bois sont de texture fine et très fibreuse : ils donnent une sciure fine et très inflammable. Par exemple, le lierre, le saule, le tilleul et le laurier constituent d'excellents matériaux.

En 1973, le Laboratoire de préhistoire de l'Université de Montpellier, ont utilisé un foret à rotation manuelle, à pointe amovible, en bois de sureau choisi pour que la moelle soit aussi réduite que possible, sur une planchette en lierre : ils allument le feu en une ou deux minutes. L'interruption du mouvement nécessaire à la remontée des mains qui sont



6. LE NECESSAIRE À FEU des bushmen du Kalahari (à gauche) est composé d'un tubercule inflammable enfermé dans une corne d'antelope, d'un morceau d'acier et d'un silex. La pierre du briquet mauritanien (à droite) est une hache polie récupérée sur un site néolithique.

Bois dur et bois tendre



J. Collins-Grand

7. LE FORET À POMPE est fondé sur le principe de la touille : lorsqu'on enroule la corde, le bois transversal remonte. Des deux mains, on le descend rapidement et la friction sur le bois posé au sol produit une braise.

descendues le long de la baguette pendant la rotation est si rapide que le bois ne refroidit pas. La technique du foret a ensuite été améliorée par l'invention de l'archet et du foret à pompe.

L'utilisation d'un archet pour faire tourner le foret, à la manière des Indiens nord-américains, des Inuits et des Aborigènes australiens, permet d'obtenir une braise en une vingtaine de secondes contre une ou deux minutes pour une rotation manuelle directe. L'archet est probablement un perfectionnement de la technique de la corde mue par deux personnes.

L'archet ne requiert qu'une seule personne. Une autre amélioration possible est l'utilisation du foret à pompe (voir figure 7), surtout utilisé pour piquer, mais qui a servi aux Indiens iroquois à allumer des feux. Le foret de ce système fondé sur le principe de la touille est animé par le déroulement et l'enroulement d'une ficelle. On le trouve

également employé à Madagascar pour la production du feu.

En Europe, on a utilisé l'allumage du feu par friction jusqu'au XIX^e siècle pour des fêtes ou pour des cérémonies curatives païennes. Un garçon et une fille étaient choisis pour allumer le « feu nouveau » à l'aide de deux bâtons de tilleul. L'expérimentation montre la pertinence du choix du bois, car, tendre et léger, il produit une sciure fine très inflammable. Par ailleurs, le choix de personnes de sexe opposé assimile la production du feu à un acte sexuel.

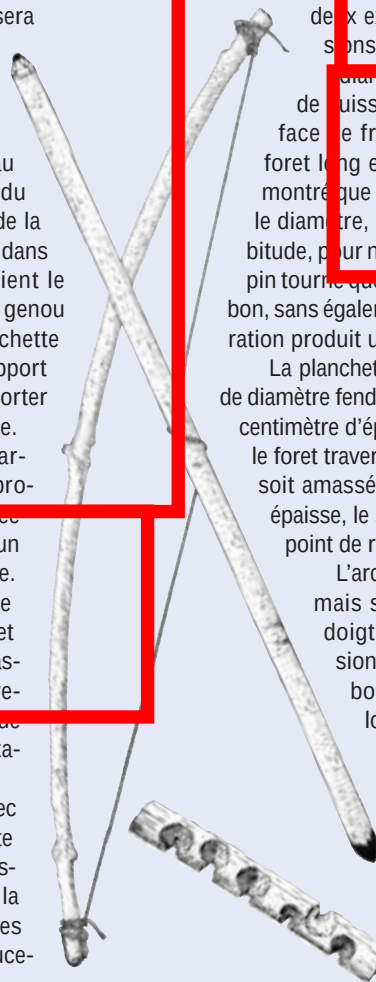
Un exemple du Pakistan oriental illustre cette sexualisation, puisque hommes et femmes utilisent des bâtons différents : lanière et bambou pour les femmes, friction de deux bambous pour les hommes. L'homme incapable de faire du feu par friction est raillé et considéré, par plaisanterie, comme incapable de se marier.

Un exemple de briquet à friction : le foret à archet

Tout d'abord, on découpe, sur le bord d'une planchette, une encoche triangulaire où se déversera la sciure et on creuse, à la pointe de l'encoche, un petit trou où s'appuiera la pointe du foret. D'une main, on enroule la cordelette distendue de l'archet autour du foret maintenu oblique. On redresse ensuite le foret perpendiculairement au plan de l'archet : la corde se tend. La pointe du foret est alors placée dans le trou d'amorçage de la planchette, et sa partie supérieure est engagée dans une paumelle, tenue dans la main, qui maintient le foret vertical en évitant de blesser la main. Un genou au sol, le pied de l'autre jambe bloque la planchette sur un papier, une écorce, une feuille ou un support destiné à collecter la sciure déversée et à transporter la braise sur un matériau facilement inflammable.

Enfin, un mouvement de translation de l'archet, légèrement plongeant, régulier et ample provoque la rotation du foret. Rapidement, de la fumée apparaît ; le processus est bien engagé lorsqu'un peu de sciure carbonisée tombe dans l'encoche. Quand la fumée s'épaissit, on augmente le rythme sans précipitation : de fugace, la fumée s'étend et cache la pointe du foret. La sciure carbonisée amassée dans l'encoche déborde. Un dernier mouvement, plus rapide, assure le résultat final. Dès que le petit tas de sciure fume par lui-même, la rotation peut s'interrompre.

Si l'on écarte très doucement, par exemple avec les doigts, le filet de fumée s'épaissit ; une petite escarbille jusqu'alors invisible apparaît et se transforme en une braise persistante et utilisable. On la pose sur une poignée de paille, d'herbes sèches ou de lichens creusée en nid et l'on souffle doucement. Les flammes jaillissent bientôt.



Le foret est un bâton de section arrondie dont les deux extrémités sont taillées en pointe. Ses dimensions sont variables. Cependant, un foret de petit diamètre tourne plus vite, mais développe moins de puissance qu'un foret de fort diamètre, car la surface de frottement sera plus petite. D'autre part, un foret long est moins rigide et vibre. La pratique nous a montré que la longueur optimale avoisine 25 centimètres ; le diamètre, un à deux centimètres. Nous avons pris l'habitude, pour nos démonstrations, d'utiliser les baguettes de pin tourné que l'on trouve dans le commerce. Le résultat est bon, sans égalier toutefois celui obtenu avec du peuplier. L'opération produit une braise en 20 secondes.

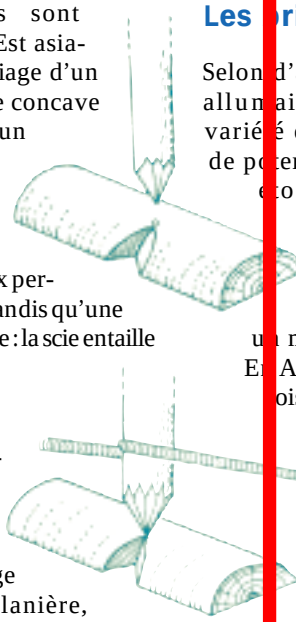
La planchette peut être une branche de deux centimètres de diamètre fendue dans sa longueur, ou une planche de 1 à 1,5 centimètre d'épaisseur. Lorsque la planchette est trop mince, le foret traverse le bois sans que suffisamment de sciure se soit amassée. En revanche, quand la planchette est trop épaisse, le sommet du tas de sciure est lent à rejoindre le point de rotation du foret, où la chaleur est efficace.

L'archet doit être assez rigide, pour tendre la corde, mais suffisamment élastique pour permettre aux doigts de moduler en cours d'opération, la tension de la corde. Celui que nous avons choisi, en bois, avait une corde de 50 centimètres. Cette longueur présente l'avantage de limiter le nombre d'allers et de retours.

Par ailleurs, l'expérience nous a montré qu'il est commode d'appuyer la partie proximale de l'archet dans le creux de la main ; deux ou trois doigts placés entre la corde et le bois de l'archet. Nous avons attaché la corde de l'archet par un nœud de cabestan.

Vous pouvez maintenant tentez vous-même l'expérience.

D'autres procédés sont employés dans le Sud-Est asiatique. Par exemple, le sciage d'un demi-bambou posé face concave vers le sol par le bord d'un autre demi-bambou. En 1996, I. Mannos et P. Boutié ont démontré l'efficacité et la rapidité de ce mécanisme, où deux personnes tiennent la «scie» tandis qu'une autre maintient la pièce fixe : la scie entaille et traverse la convexité du bambou fixé au sol, et la sciure tombe jusqu'à l'obtention d'une braise. En Papouasie-Nouvelle-Guinée, les ethnologues ont décrit le sciage d'un bambou par une lanière, par exemple.



fréquent dans le Sud-Est asiatique et décrit dans le roman *Taïpi* de Hermann Melville, est celui du rainurage d'une planchette par une baguette. Ces procédés sont fondés sur le même principe : la chaleur produite par le frottement embrase une sciure fine résultant de l'usure de deux b

Les traces les plus anciennes de planchettes et de forets à feu ont été découvertes dans la grotte de Guitarrero, dans les Andes péruviennes, celles dateraient de 10 000 ans avant notre ère.

Les vestiges néolithiques des lacs suisses contiennent probablement de tels objets et le site de l'âge du fer de Toro, au Japon, en a fourni de nombreux exemplaires. Ces objets en bois se conservent mal et, en conséquence, leurs traces archéologiques sont rares. Toutefois, on peut supposer que ce système était connu des *Homo sapiens* de la fin du Paléolithique supérieur.

La technique de friction de deux morceaux de bois ou de corne ou de pierre sur du métal ou sur de la marcassite sont deux méthodes efficaces très utilisées, mais sont-elles les seuls moyens d'allumer un feu ?



8. LA POINTE DU FORET est placée dans le trou d'amorçage. Puis, à l'aide d'une corde (archet ou pompe), le foret tourne et la friction produit de la sciure qui s'écoule dans l'encoche où, aérée, elle finit par brûler en une braise.

Les briquets exotiques

Selon d'anciens récits, à Bornéo, on allumait du feu en frappant une variété de bambou avec un tesson de poterie. En 1993, cette technique est maintenant confirmée en Papouasie, où le préhistorien Pierre Pétréquin a vu allumer du feu par percussion d'un bambou avec un morceau de hache polie.

En Asie du Sud-Est, le feu est parfois allumé avec un briquet à piston. Il se compose d'un piston en bambou, en os ou en corne, couvrant de façon parfaitement étanche dans un cylindre.

La compression de l'air contenue dans le corps de piston produit un échauffement suffisamment important pour enflammer une substance fixée à l'extrémité du piston. Ce briquet récemment reproduit avec un corps de piston en bambou et un piston en bois, fonctionne parfaitement. La seule difficulté réside dans l'obtention d'une étanchéité parfaite : un joint de fil de soie lubrifié par du saindoux fait l'affaire.

Ce type de briquet, que le physicien Michael Faraday proposait en 1830 comme test d'habileté pose un problème d'histoire des techniques.

Indépendamment en Asie du Sud-Est et en Europe ? Aucune preuve indubitable n'infirme ni ne confirme cette hypothèse. Outre la question des apparitions multiples de briquets, les historiens s'interrogent sur la chronologie.

Les plus vieux restes archéologiques européens de briquets datent du Paléolithique supérieur. Ils sont

nodules de marcassite, associés à des lames-briquets en silex. L'invention

de ce procédé semble plus facile que celle du briquet à friction : des étincelles produites fortuitement lors de la

taille de silex par un percuteur de marcassite sont peut-être à l'origine de la domestication du feu. La drille à feu l'aurait ensuite supplanté.

Cependant, les drilles et les planchettes à feu de la grotte de Guitarrero, au Pérou, montrent que le foret à feu est connu depuis 10 000 ans avant notre ère. Dans le Nord-Ouest de l'Argentine, il est surtout attesté depuis la période des chasseurs-cueilleurs jusqu'à celle des agriculteurs-céramistes. En pays andins, la rareté des bois a conduit les Précolombiens à utiliser certaines pièces d'attelage des lamas comme pièce passive pour produire du feu. Les rares vestiges aujourd'hui connus et le caractère périssable des briquets à friction incitent à la prudence dans la détermination du procédé le premier inventé, même si, en Europe, les briquets les plus anciens sont des briquets à marcassite.

L'interprétation des techniques d'allumage du feu bénéficie d'un éclairage nouveau grâce à l'expérimentation, longtemps négligée, qui démontre l'absence de bien-fondé de l'hypothèse du bois dur et du bois tendre. Dès l'Antiquité, le philosophe grec Théophraste (-372 ; -287) préconisait un bois dur et un bois tendre. Quelques siècles plus loin en disant que l'on peut prendre deux essences de même nature. Cette assertion, qui est aussi présente dans l'œuvre du naturaliste Plinius l'Ancien (23 ; 79), a persisté jusqu'à nos jours dans les écrits des préhistoriens et des ethnologues ; elle a été propagée par les récits de voyages et par les romanciers.

Un exemple du feu montre que l'étude des techniques et le problème de leur apparition ne sont pas toujours coupés. Leur aspect pratique et utilitaire puisqu'elles s'associent avec tous les autres aspects de la vie psychologique et sociale : il s'agit d'une réalité bien connue des ethnologues, mais souvent sous-estimée par les préhistoriens qui ne peuvent fonder leur interprétation que sur la logique, la plus évidente, des objets matériels.

Jacques COLLINA-GIRARD est géologue et préhistorien à l'UMR 6636 du CNRS, à Aix-en-Provence.

J. COLLINA-GIRARD, *Le feu avant les allumettes*, Éditions de la Maison des sciences de l'homme, 1998.

P. BOUTIÉ et I. MANNOS, *Le briquet pneumatique*, in *Pour la Science*, avril 1997.

L'hypertension chez les Noirs d'Amérique

RICHARD COOPER • CHARLES FOTIMI • RYK WARD

L'hypertension est fréquente chez les Noirs américains, et on lui attribue souvent une origine génétique. Toutefois, elle est rare chez les Africains : on doit en conclure que l'environnement agit sur l'expression des gènes.

La pression artérielle augmente avec l'âge, et près d'un Européen et d'un Américain sur quatre sont hypertendus (leur pression artérielle est supérieure à la normale). L'hypertension, qui favorise les maladies cardiovasculaires, les accidents vasculaires cérébraux, les insuffisances rénales, intervient dans environ 170 000 décès par an en France (500 000 aux États-Unis). La situation est encore pire pour les Noirs américains : 35 pour cent d'entre eux sont hypertendus, contre 28 pour cent des Blancs. Dans cette population résultent de l'hypertension (deux fois plus que chez les Blancs).

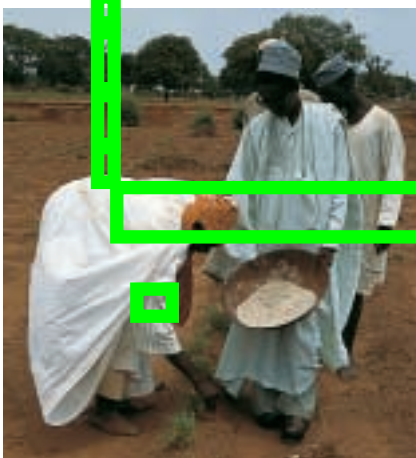
On a longtemps attribué cette disparité entre les Noirs et les Blancs à une «prédisposition génétique» à l'hypertension. Cette conclusion n'est guère satisfaisante, car elle n'explique pas bien les faits et semble plutôt

résulter d'un racisme sanitaire qui existe aux États-Unis : l'origine raciale est alors considérée comme la cause sous-jacente de la maladie, et non comme l'une des nombreuses variables (parmi lesquelles la situation socio-économique) qui déterminent l'apparition des maladies.

Pour comprendre l'origine de l'hypertension chez les Noirs américains, nous pensons qu'il faudrait commencer par abandonner les hypothèses classiques sur les races. L'hypertension est le résultat de l'interaction de facteurs externes (tels le stress ou le régime alimentaire), la physiologie (les systèmes biologiques qui contrôlent la pression artérielle) et les gènes de régulation de la pression artérielle. On ne comprendra comment l'hypertension se développe et pourquoi sa fréquence est si élevée chez les Noirs américains que si l'on identifie toutes

les connexions entre ces différents facteurs. Un tel travail conduira, en outre, à la découverte de mesures thérapeutiques appropriées.

Pour comprendre le rôle des facteurs environnementaux, on pourrait étudier l'influence des conditions de vie et des comportements sur des personnes qui ont le même patrimoine génétique, mais vivent dans des environnements différents. Ce genre de travail est difficile, parce que les personnes étudiées ont plusieurs facteurs de prédisposition à l'hypertension : un régime riche en sel, un stress chronique, le manque d'exercice physique et l'excès de boissons alcoolisées. De même, on identifierait difficilement les causes du cancer du poumon dans une société où tout le monde fume : sans témoins qui ne fument pas, on ne peut savoir que le tabagisme favorise le cancer du poumon.



Yoann Lehmann, Peter Arnold, Inc.



Yoann Lehmann, Peter Arnold, Inc.



Donna Brider, Impact Visuals

1. LA FRÉQUENCE DE L'HYPERTENSION, ou augmentation chronique de la pression artérielle, a été mesurée chez des Africains et chez des personnes d'origine africaine vivant aux États-Unis et aux Antilles (graphique). La différence est particulièrement marquée entre les

Les leçons du passé

Afin de trouver le groupe témoin qui nous manquait, nous avons étudié les populations d'Afrique. En 1991, nous avons lancé un programme de recherche sur les Africains qui ont été contraints de quitter l'Afrique de l'Ouest entre le XVI^e et le XIX^e siècle. Pendant l'histoire du monde, les marchands d'esclaves européens ont acheté ou capturé environ dix millions de personnes, et les ont transportées vers les Antilles et vers l'Amérique où elles se sont progressivement métissées avec des Européens et avec des Indiens. Aujourd'hui, leurs descendants vivent dans tout l'Occident.

Dans l'Afrique de l'Ouest rurale, l'hypertension est extrêmement rare (on n'observe une fréquence aussi faible que dans certaines régions du bassin aréolaire du Sahel, au Sud). Au contraire, les personnes d'origine africaine qui vivent en Occident sont très sujettes à l'hypertension : un facteur lié à l'environnement ou au mode de vie des Noirs européens et américains (plutôt qu'un facteur génétique) serait la principale cause de leur prédisposition à l'hypertension artérielle.

Pour élucider la cause de cette hypertension, nous avons financé des programmes de recherche au Nigeria, au Cameroun, au Zimbabwe, à Sainte-Lucie, à la Barbade, à la Jamaïque et aux États-Unis. Progressivement, nous avons concentré nos recherches sur le Nigeria, la Jamaïque et les États-Unis, trois pays qui nous permettaient de suivre les effets de l'environnement sur la santé des Africains transplantés vers l'Occident. Nous

avons mesuré la tension artérielle de personnes sélectionnées de façon aléatoire dans ces populations pour déterminer la fréquence de l'hypertension et de ses facteurs de risque, tels que la consommation de sel, l'obésité ou la sédentarité.

Comme prévu, nous avons trouvé des différences notables entre ces trois pays. Dans la communauté nigériane que nous avons étudiée, dans une zone rurale, la polygamie est fréquente, et les familles sont étendues et complexes ; en moyenne, une femme élève cinq enfants. Les habitants d'Igbo-Ora sont généralement maigres, ils pratiquent une agriculture de subsistance qui demande des efforts physiques et se nourrissent traditionnellement de riz, de tubercules et de fruits.

Les pays de l'Afrique subsaharienne n'ont pas de registre de la mortalité et de l'espérance de vie, mais les infections et, notamment, le paludisme, en sont responsables. Le taux de mortalité est élevé. Nous avons observé qu'à Igbo-Ora le taux de mortalité chez les adultes est compris entre un et deux pour cent, une valeur élevée par rapport à la moyenne des pays occidentaux. Ceux qui vivent vieux sont en assez bonne santé : la tension artérielle n'augmente pas avec l'âge, et l'hypertension est rare.

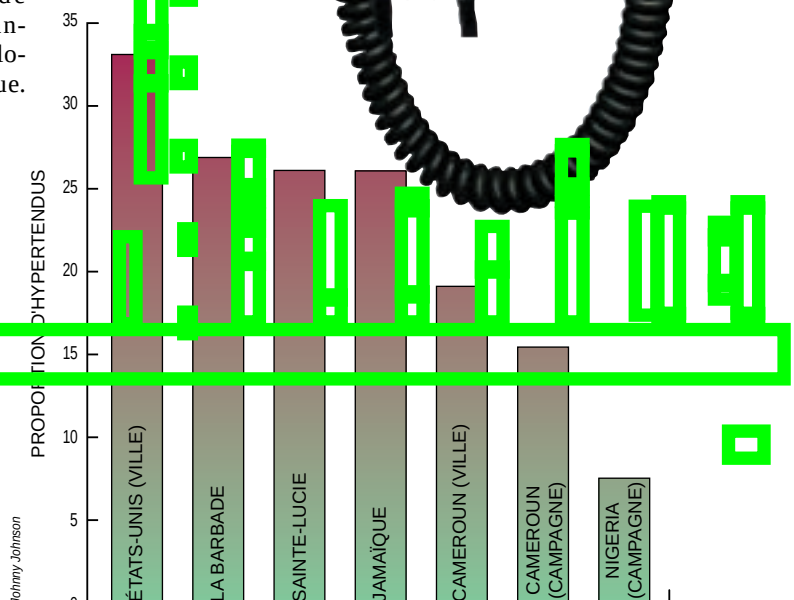
Au contraire, la Jamaïque est un pays qui s'industrialise ; les risques d'infection y sont faibles, mais les maladies chroniques plus fréquentes qu'au Nigeria. Nous y avons étudié des habitants de Spanish Town, l'ancienne capitale coloniale de la Jamaïque.

C'est une ville trépidante de 90 000 habitants, où toute la société jamaïcaine est représentée.

À la Jamaïque, la structure familiale s'est écartée du patrilat africain. Les femmes dirigent souvent le foyer, les familles sont petites et souvent fragmentées. Le chômage tend à réduire leur statut social. Le travail de la terre et les gros travaux sont fréquents. Les habitants mangent des aliments traditionnels et des produits modernes commercialisés. Les Jamaïcains sont souvent pauvres, mais, en moyenne, ils vivent six ans de plus que les Noirs américains, parce qu'ils ont peu de maladies cardio-vasculaires et de cancers.



Jim Sugar Photography, Corbis



Johnny Johnson

Noirs américains qui vivent en ville (à droite) et les Nigériens qui vivent à la campagne (à gauche). L'hypertension semble ainsi due à l'industrialisation : le patrimoine génétique à lui seul n'explique pas pourquoi tant de Noirs américains sont hypertendus.

Aux États-Unis, enfin, nous avons étudié la population noire de Maywood, près de Chicago. Les adultes âgés de cette population sont nés dans le Sud des États-Unis, surtout dans le Mississippi, dans l'Alabama ou dans l'Arkansas. Les migrations vers le Nord semblent avoir amélioré leur état de santé et leur situation économique. Les hommes ont été employés dans l'industrie

Ressemblances et différences

Alors que nous explorions ces diverses cultures, nous avons vérifié que les personnes étudiées avaient le même patrimoine génétique : les Noirs américains et jamaïcains qui ont participé à l'étude avaient environ 75 pour cent de leur patrimoine génétique commun avec les Nigériens. Pourtant plusieurs différences sont apparues.

Tout d'abord, la fréquence de l'hypertension : sept pour cent seulement des Nigériens avaient une pression artérielle élevée, la fréquence étant supérieure dans les zones urbaines. Près de 26 pour cent des Noirs jamaïcains et 33 pour cent des Noirs américains étudiés souffraient d'hypertension ou prenaient déjà un traitement contre l'hypertension. De surcroît, certains facteurs de risque étaient plus fréquents à mesure que nous passions de la campagne à la ville : l'indice de masse corporelle (une mesure du poids rapporté à la taille) et la consommation moyenne de sel augmentaient progressivement. La surcharge pondérale, le manque d'exercice et un régime alimentaire peu diversifié et salé expliquent en grande partie l'augmentation du risque d'hypertension.

La diaspora africaine illustre les conséquences des modifications de l'environnement et du mode de vie sur une société dont le patrimoine génétique a peu changé. Notre étude soulève également une question : l'augmentation de la pression artérielle est-elle inévitable dans les sociétés industrialisées, quelle que soit la couleur de la peau ? Le système cardio-vasculaire humain s'est développé et évolué dans le cadre de l'Afrique rurale, où l'obésité était rare, la consommation de sel modérée, le régime pauvre en graisses et l'activité physique élevée. Aujourd'hui, les agriculteurs ont un mode de vie qui n'a guère changé : leur pression artérielle augmente très peu avec l'âge, et l'obésité est très rare, presque pas. Ainsi, les agriculteurs africains représentent un groupe témoin auquel les épidémiologistes peuvent comparer les populations des sociétés industrialisées.

Lorsque les conditions de vie changent, le risque d'hypertension augmente. Par exemple, l'urbanisation fait augmenter la pression artérielle : dans

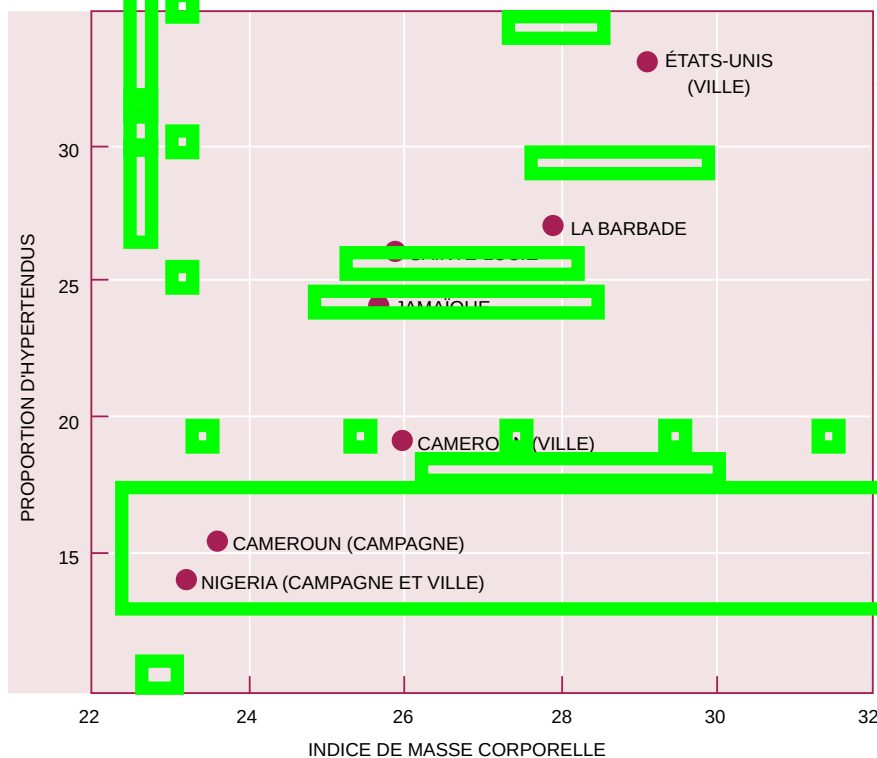
Que mesure la pression artérielle ?

La pression artérielle est mesurée à l'aide d'un tensiomètre, qui donne deux chiffres : la pression systolique et la pression diastolique. La pression systolique indique la pression maximale exercée par le sang sur les parois des artères : elle correspond à la contraction du ventricule gauche du cœur, qui expulse le sang dans les artères. La pression diastolique correspond à la pression minimale s'exerçant sur les vaisseaux sanguins ; elle indique que le ventricule gauche s'est relâché et se remplit de sang. Une pression systolique normale se situe aux environs de 120 millimètres de mercure, et une pression diastolique normale vers 80 millimètres de mercure (la tension est alors notée 120/80).

Dans des situations de stress, la tension augmente de façon passagère. Une per-



sonne est hypertendue quand sa tension est régulièrement supérieure à 14/9. Un régime alimentaire adapté, des exercices physiques et des médicaments antihypertenseurs suppriment généralement l'hypertension.



2. L'INDICE DE MASSE CORPORELLE mesure l'embonpoint (le rapport du poids sur la taille). Quand cet indice est supérieur à 25, on considère généralement qu'il y a surcharge pondérale. Les cas d'hypertension sont rares dans les populations où l'indice de masse corporelle est faible. Quand l'indice augmente, la fréquence de l'hypertension aussi. Ainsi l'obésité contribuerait à l'élévation de la pression artérielle.

Hypertension et esclavage

Certains médecins ont prétendu que l'hypertension des Noirs américains résulterait de la traite des Noirs : sur les navires qui les transportaient d'Afrique en Amérique, les esclaves étaient placés dans une situation darwinienne qui aurait modifié le patrimoine génétique du groupe : seuls survivaient ceux qui avaient les « bons » gènes, ceux qui confèreraient, aujourd'hui, un risque accru d'hypertension.

Les biologistes invoquent souvent les théories évolutives pour expliquer pourquoi certains groupes raciaux ou ethniques sont davantage prédisposés aux maladies. Le raisonnement est le suivant : la population a subi une pression de sélection qui a favorisé la survie de quelques membres du groupe (et de leurs gènes) et qui a éliminé les autres. Si la population survivante ne mélange pas ses gènes avec ceux d'autres groupes raciaux ou ethniques, la fréquence de certains gènes augmente. En supposant que les Noirs américains ont bien une prédisposition génétique à l'hypertension, on s'interroge : quelle a été la pression si spécifique et si puissante qui a sélectionné un caractère pathologique aussi fréquent ?

Selon certains, c'était le voyage dans les bateaux des négriers. La mortalité des esclaves était extrêmement élevée avant le départ, pendant la traversée et après l'arrivée en Amérique. Les principales causes de mortalité étaient les diarrhées, la déshydratation, et certaines infections : dans les trois cas, une perte de sel était fatale. L'aptitude à retenir le sel aurait été un facteur de survie pour les Africains emportés vers l'Amérique. Aujourd'hui, la rétention du sel prédisposerait leurs descendants à l'hypertension.

Malgré son attrait, cette hypothèse soulève des difficultés, et nous pensons qu'elle a été acceptée trop rapidement. Tout d'abord, on n'a pas de preuves que les conditions de pertes excessives de sel aient été la principale cause de décès sur les bateaux. Les Africains mouraient aussi de tuberculose et de mauvais traitements.

D'autre part, les bases biologiques de la théorie évolutive de l'hypertension sont contestables. La diarrhée et d'autres maladies à perte de sel ont toujours été les principaux fléaux de l'humanité, surtout chez les enfants. La pression de sélection résultante aurait dû s'appliquer à tous les groupes raciaux et ethniques. D'ailleurs, aux Antilles, au XVIII^e siècle, la mortalité des Blancs était comparable à celle des esclaves : la pression de sélection ne s'appliquait pas qu'aux Africains. Enfin, les Africains qui ont émigré en Europe ces dernières décennies ont aussi une pression artérielle supérieure à celle des Blancs, ce qui évoque soit un effet de l'environnement, soit une susceptibilité génétique.

Aujourd'hui, on manque d'informations sur les gènes de la sensibilité au sel pour tester l'hypothèse du stress du voyage des esclaves. Si ce voyage a fonctionné comme un goulot d'étranglement de l'évolution, il aurait dû réduire à la fois la taille de la population et sa diversité génétique, car seules les personnes ayant un patrimoine génétique adapté auraient survécu. Or la diversité génétique est grande parmi les Noirs américains.

L'hypothèse de l'esclavage justifie hâtivement la théorie génétique et raciale de l'hypertension chez les Noirs américains. Les chercheurs et le grand public ont tendance à accepter des explications génétiques aux différences entre Blancs et non-

Blancs, sans analyser complètement les preuves disponibles. Cette attitude est évidemment un obstacle notable à une recherche objective. Les recherches sur les gènes sont objectives, puisque l'on mesure des variations de séquences d'ADN ; elles contraindront peut-être la société à abandonner ses préjugés raciaux et ethniques, mais elles risquent aussi de leur fournir une nouvelle légitimité. L'issue dépendra de la façon dont les généticiens interpréteront leurs découvertes dans un contexte qui tiendra compte de la complexité des sociétés et de leur histoire.



Les négres dans la cale, gravé par Deroy ; publié par Engelmann, CIRCA 1835 ; lithographie de Johann Moritz Rugendas (1802-1858), U.K./Bridgeman Art Library, London/New York

la ville d'Ibadan, au Nigeria, l'hypertension est plus fréquente que dans les zones rurales proches, bien que la prévalence de l'obésité et la consommation de sel soient quasi les mêmes. D'autres facteurs, tels le stress psychologique ou le manque d'activité physique, favoriseraient cette augmentation.

Le stress psychologique et le stress social sont très difficilement mesurables. Toutefois, il est incontestable qu'en Europe et en Amérique les Noirs subissent un stress particulier : la discrimination raciale. On ignore les effets à long terme du racisme sur la pression artérielle, mais on sait que, dans certaines îles des Antilles, dont Trinité, Cuba et Porto Rico, la tension artérielle moyenne des Noirs est à peu près la même que dans les autres groupes. Sur ces îles, les relations entre les diverses communautés raciales seraient peut-être moins dommageables pour le système cardio-vasculaire que sur le continent américain.

Le rôle de l'environnement

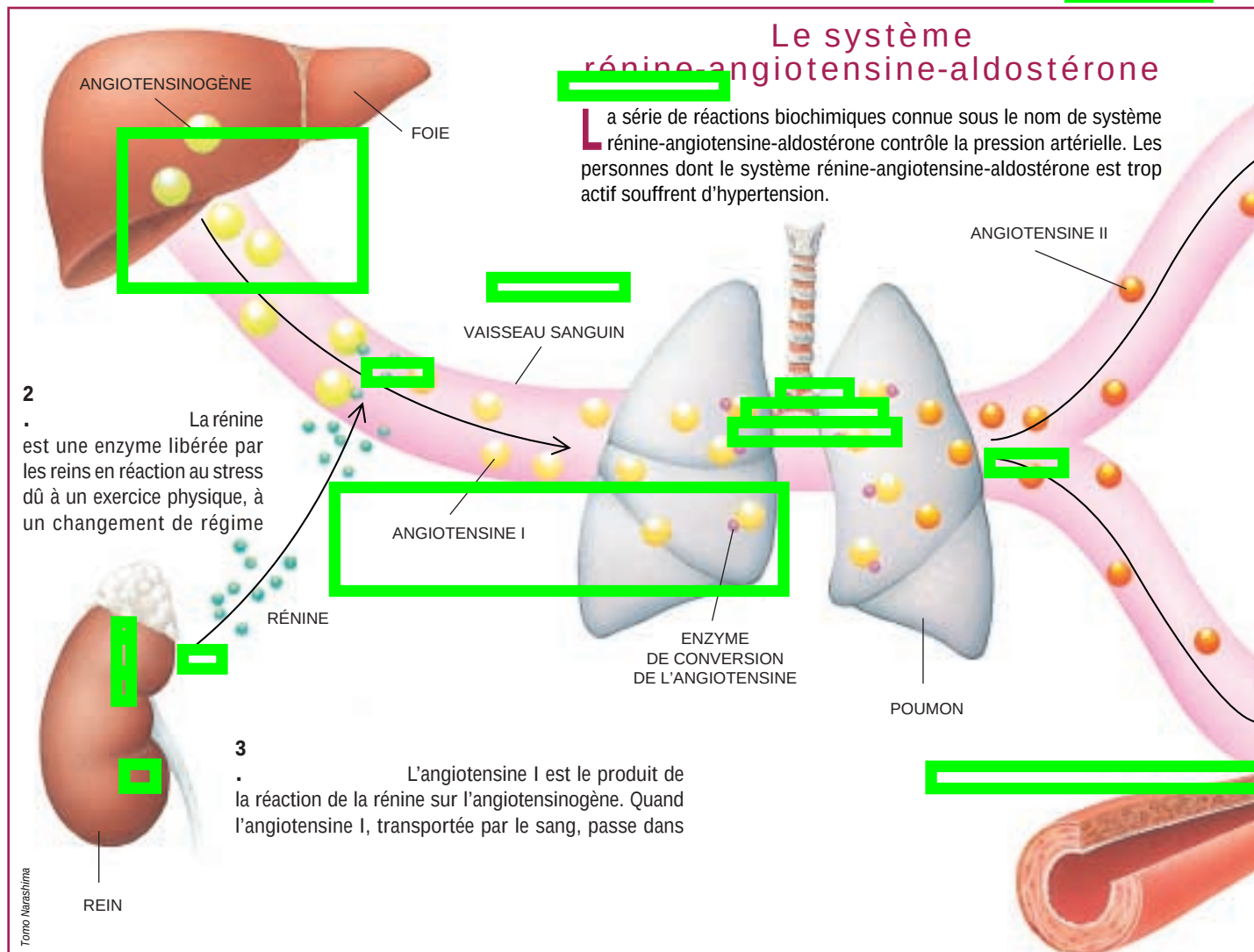
Au-delà des constatations, nous avons cherché les interactions de l'environnement et des facteurs de risque biologiques qui favorisent l'hypertension. Les physiologistes ont découvert pas encore parfaitement les mécanismes de la régulation de la pression artérielle, mais on sait que les reins jouent un rôle essentiel : ils ajustent la concentration sanguine en ions sodium (provenant du sel de l'alimentation, le chlorure de sodium), qui influence sur le volume sanguin et donc la pression artérielle.

L'espèce humaine ayant évolué dans un environnement où le régime alimentaire était pauvre en sel, les reins ont une grande aptitude à retenir cet ion vital : au cours de la filtration du sang, quand les reins éliminent les déchets, ils retiennent jusqu'à 98 pour cent du sodium qui les traverse et ils le recyclent dans le

sang. Quand la concentration en sodium est trop élevée, les reins en excrètent des quantités excessives dans le sang, ce qui augmente la pression artérielle. Un excès de sel dans les reins risque également d'endommager le système de filtration entraînant une élévation chronique de la pression artérielle.

Afin d'analyser la régulation de l'équilibre sodique chez les personnes suivies, nous avons mesuré l'activité du système rénine-angiotensine-aldostérone, un système biochimique essentiel à la régulation de la pression artérielle.

Cette série de réactions biochimiques commande la quantité de la protéine nommée angiotensine II dans le sang. L'angiotensine II a plusieurs fonctions : elle déclenche la constriction des vaisseaux sanguins, ce qui augmente la pression artérielle, et favorise la libération d'une autre substance, l'aldostérone, qui renforce la réabsorption du sodium par les reins. Ainsi, un



Tomo Narashima

système rénine-angiotensine-aldostérone très actif semble associé à une pression artérielle élevée.

Pour suivre l'activité du système rénine-angiotensine-aldostérone chez les personnes sélectionnées pour notre étude, nous avons mesuré la concentration sanguine en angiotensinogène (une protéine qui intervient dans la première étape du système rénine-angiotensine-aldostérone) (voir l'illustration ci-dessous). L'angiotensinogène est intéressant, car, contrairement à d'autres produits du système qui sont très éphémères, sa concentration est à peu près constante.

Comme prévu, nous avons trouvé que, plus l'angiotensinogène est abondant, plus la pression artérielle est élevée (c'est surtout vrai chez les hommes, car, chez les femmes, les variations des concentrations en estrogènes modulent également la pression artérielle). De plus, la concentration moyenne en angiotensinogène augmente du

Nigeria à la Jamaïque et aux États-Unis (parallèlement à la fréquence de l'hypertension), tant chez les hommes que chez les femmes.

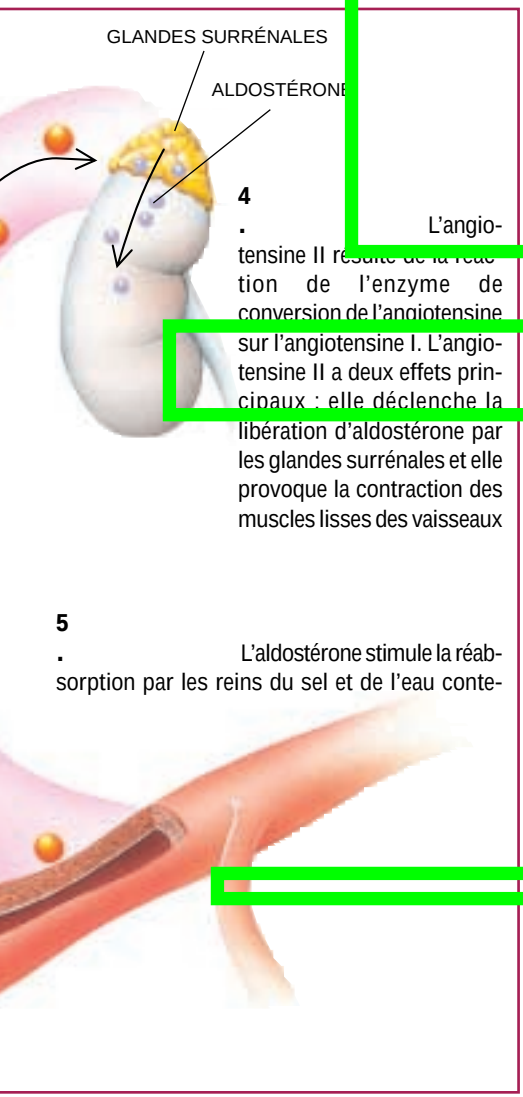
Ainsi, certains des facteurs qui favorisent l'hypertension semblent agir en augmentant la concentration sanguine en angiotensinogène; ce serait le cas de l'obésité, notamment. On a montré, par exemple, que l'obésité est associée à une augmentation de la concentration sanguine en angiotensinogène. Dans les groupes que nous avons suivis, la fréquence de l'obésité augmente environ comme l'hypertension et comme la concentration en angiotensinogène. Ces relations n'indiquent pas nécessairement des causalités, mais montrent que l'obésité semble favoriser l'hypertension en stimulant la production d'angiotensinogène.

Des indices génétiques

En étudiant le gène codant la protéine angiotensinogène dans le développement de l'hypertension, les généticiens ont découvert qu'il existe plusieurs «versions» (ou allèles) du gène codant l'angiotensinogène, dont certaines sont associées à une surproduction de la protéine. Les personnes qui ont un tel allèle semblent avoir un risque accru d'hypertension.

Il y a quelques années, Pierre Corvol et ses collègues de l'Unité 36 de l'INSERM et des biologistes de l'Université de l'Utah ont observé que deux allèles de l'angiotensinogène, nommés 235T et 170C, sont associés à des concentrations élevées en angiotensinogène et à une hypertension chez les populations de souche européenne. Toutefois, on ignore si ces allèles jouent eux-mêmes un rôle dans la régulation de l'angiotensinogène ou s'ils sont seulement des marqueurs hérités en même temps que d'autres allèles qui ont réellement un rôle fonctionnel.

Toutefois, un gène associé à une prédisposition accrue à l'hypertension n'est pas la cause de la maladie: certains individus ont de tels gènes sans souffrir d'hypertension. Les généticiens ont établi que les facteurs génétiques expliquent 20 à 40 pour cent de la variabilité interindividuelle de la pression artérielle et que de nombreux gènes, peut-être une quinzaine, participent à cette variabilité. Autrement dit, chaque gène associé à l'hypertension contribue seulement à un ou deux pour cent des



Ce magazine vous intéresse !



Vous pouvez aussi :

- ☐ Sciences-actuelles
- ☐ Actualité en astronomie
- ☐ Les actualités biomédicales
- ☐ Nouvelles de l'environnement
- ☐ Le texte intégral de conférences au Palais de la découverte
- ☐ Le commentaire des expositions permanentes et temporaires
- ☐ Le programme des activités de l'été de la découverte

Je souscris un abonnement à la

REVUE DU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE

Je joins mon règlement par chèque à l'ordre du

PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
(CEP 9065 48 J PARIS)

Tarif France : 170 F (10 numéros par an)
Tarif étranger : 200 F
par mandat international uniquement
(par avion, supplément de 80 FF)
Abonnement de soutien : 230 F

Nom (M., Mme, Mlle) :
Prénom :
Adresse :
Ville :
Code postal :
Profession :

à retourner avec votre règlement à
Revue du PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
Av. Franklin-D.-Roosevelt - 75008 Paris.
Tél. : 01 40 74 80 00

différences interindividuelles de la pression artérielle. Enfin, ce gène ne favorisera l'hypertension qu'en présence des facteurs environnementaux nécessaires à son expression.

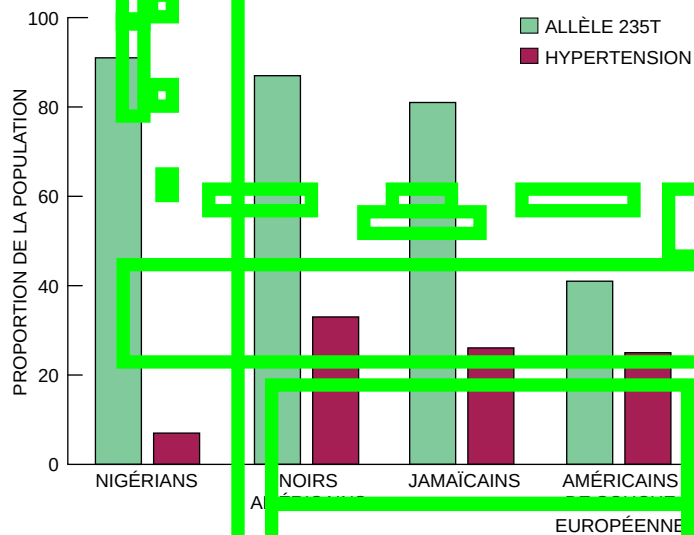
Nos études corroborent que l'allèle 235T est deux fois plus fréquent parmi les Noirs américains que chez les Blancs, mais les Noirs qui ont cet allèle ne sont pas plus hypertendus que les Noirs qui n'en sont dépourvus. Chez les Nigériens de notre étude, les porteurs de l'allèle 235T ont une concentration sanguine en angiotensinogène un peu supérieure à la moyenne,

mais le risque d'hypertension n'est pas augmenté. De plus, 90 pour cent des Africains étudiés ont l'allèle 235T, mais la fréquence de l'hypertension dans cette communauté est extrêmement faible, comme nous l'avons déjà mentionné (la fréquence de l'allèle 174M est la même dans tous les groupes).

Ainsi, l'allèle 235T ne semble pas suffisant pour déclencher une hypertension chez les personnes d'origine africaine; d'autres facteurs génétiques, physiologiques ou environnementaux seraient également nécessaires. Ou encore, cet allèle n'a-t-il pas la même importance pour le développement de l'hypertension dans tous les groupes ethniques?

Des éléments de l'énigme

Bien que nos résultats confirment que le patrimoine génétique et l'environnement interagissent pour modifier la physiologie, par exemple pour favoriser une hypertension, les généralisations ne doivent pas être trop hâtives. Il est clair qu'un unique allèle, pas plus qu'un unique facteur environnemental, n'explique l'origine ni la fréquence de l'hypertension chez les Noirs américains. Une personne qui a un ensemble d'allèles de prédisposition risque d'avoir une pression artérielle élevée, mais, comme l'a montré notre étude sur la diaspora africaine, l'hypertension n'apparaît que dans certaines conditions. Plusieurs équipes continuent à rechercher les gènes de l'hypertension et les facteurs environnementaux qui



3. LA PRÉSENCE DE L'ALLÈLE 235T, une version particulière d'un gène, est associée à l'hypertension dans certains groupes ethniques. En revanche, les Nigériens sont rarement hypertendus, mais l'allèle 235T y est très fréquent. On sait aujourd'hui qu'un seul gène ne peut déclencher une hypertension

favorisant la maladie, et à déterminer comment ils interagissent pour déclencher une élévation chronique de la pression sanguine.

Aujourd'hui, l'hypertension est responsable de sept pour cent des décès dans le monde, et son incidence augmente avec l'industrialisation. Les mécanismes d'évolution étant très lents, la médecine devra trouver des moyens de lutter contre les effets néfastes de l'environnement moderne. L'hygiène a progressé quand la médecine a découvert les mécanismes de la contagion. La compréhension des maladies cardiovasculaires a progressé quand les biologistes ont mis en évidence l'importance des habitudes alimentaires sur le métabolisme du cholestérol. La prévention et le traitement de l'hypertension exigeront que l'on comprenne comment les gènes et l'environnement interagissent pour perturber la régulation de la pression artérielle.

Nous pensons aussi que, pour mieux comprendre l'hypertension chez les Noirs américains, la communauté scientifique doit s'interroger sur le sens de nos divisions ethniques et raciales. Il n'y a pas de fondement biologique au concept de race, qui reflète des distinctions sociales plutôt que des distinctions scientifiques bien définies. Il y a longtemps que les anthropologistes ont abandonné l'idée de subdiviser *Homo sapiens* en races ou en sous-espèces. Pourtant, certains médecins

continuent à attribuer une signification biologique aux désignations raciales, prétendant que le concept les aide à distinguer les différents groupes et à expliquer la fréquence de certaines maladies. Toutefois, les classifications raciales ne sont pas fondées sur des critères scientifiques rigoureux.

Tandis que les chercheurs débattent de la signification scientifique des races, leur sens social ne doit pas être oublié. Nous vivons dans un monde où les désignations raciales ont une signification regrettable. Les effets destructeurs du racisme sont plus évidents que ceux de l'hypertension, d'une maladie, telle l'hypertension, dans laquelle nous devons continuer à étudier les interactions complexes entre les facteurs de risque extérieurs tels le stress et l'obésité, et les gènes de régulation de la pression artérielle, nous obtiendrons des informations riches d'enseignements, quelle que soit notre couleur de peau.

Richard S. COOPER et Charles ROTIMI travaillent à l'École de médecine Stritch, à Chicago. Ryk WARD dirige l'Institut d'anthropologie biologique de l'Université d'Oxford.

X. JEUNE, M. MITRE, F. SOUBRIER, Y.V. KOTELTSEV, J.P. LIFTON, C.S. WILLIAMS, A. CHAIKU et al., *Molecular Basis of Human Hypertension: Role of Angiotensinogen*, in *Cell*, vol. 75, n° 1, pp. 169-180, octobre 1992.

Ryk WARD, *Familial Aggregation and Genetic Epidemiology of Blood Pressure*, in *Hypertension: Pathophysiology, Diagnosis and Management*, sous la direction de J.H. Laragh et B.M. Brenner, Raven Press, 1990.

Richard S. COOPER et Charles N. ROTIMI, *Hypertension in Populations of African Origin: Is It Genetic?*, in *Journal of Hypertension*, vol. 12, n° 3, pp. 215-227, mars 1994.

Philip D. CURTIN, *The Slavery Hypothesis for Hypertension among African Americans: The Historical Evidence*, in *American Journal of Public Health*, vol. 82, n° 12, pp. 1681-1686, décembre 1992.

Richard S. COOPER et al., *Hypertension Prevalence in Seven Populations of African Origin*, in *American Journal of Public Health*, vol. 87, n° 2, pp. 160-168, février 1997.

La naissance des espèces

MELANIE STIASSNY • AXEL MEYER

L'extraordinaire diversité des poissons du groupe des cichlidés éclaire les mécanismes d'apparition de nouvelles espèces.

La femelle *Haplotaxodon tricoti* s'occupe de ses jeunes

Les différents *Tropheus duboisi* colorés vivent dans des amas rocheux distincts

C la Tanzanie et la Zambie, le lac Tanganyika s'étend sur plus de 700 kilomètres, du Nord au Sud, et sur environ 32 000 kilomètres carrés. Les berges les plus ensoleillées abritent la plupart des espèces de cichlidés, tels que les poissons marrons ou verts,

couverts de taches bleues, du genre *Eretmodus*. Les eaux agitées ramènent en permanence ces poissons au dos arrondi vers les rochers couverts d'algues, qu'ils coupent et raclent grâce à leurs dents tranchantes. Des *Tanganicodus* insectivores, au dos également arrondi, ont une tête plus allongée et

1. LES BERGES ROCHEUSES du lac Tanganyika abritent des centaines d'espèces de cichlidés. Chacune est adaptée à une niche écologique étroite.

Erotmodus cyanostictus se nourrit d'algues

Tanganicodus irsacae déloge les insectes

Le mâle *Lamprologus ocellatus* s'occupe d'une femelle nichée dans la coquille vide d'un escargot

Les cobras s'attaquent souvent aux cichlidés qui vivent dans des coquilles

un museau pointu, muni de dents longues et fines, adaptées à l'extraction des larves d'insectes cachées dans les anfractuosités.

Dans des eaux plus calmes, des coquilles d'escargots abandonnées, jonchant les bancs sablonneux, hébergent de minuscules femelles *Lamprologus*

avec leurs œufs et leurs jeunes. Trop gros pour pénétrer dans ces abris, les mâles, jaunes, verts ou marron, se disputent les coquilles – avec parfois une femelle à l'intérieur –, puis parquent autour de leur harem.

D'autres poissons racleurs d'algues, du genre *Tropheus*, vivent parmi

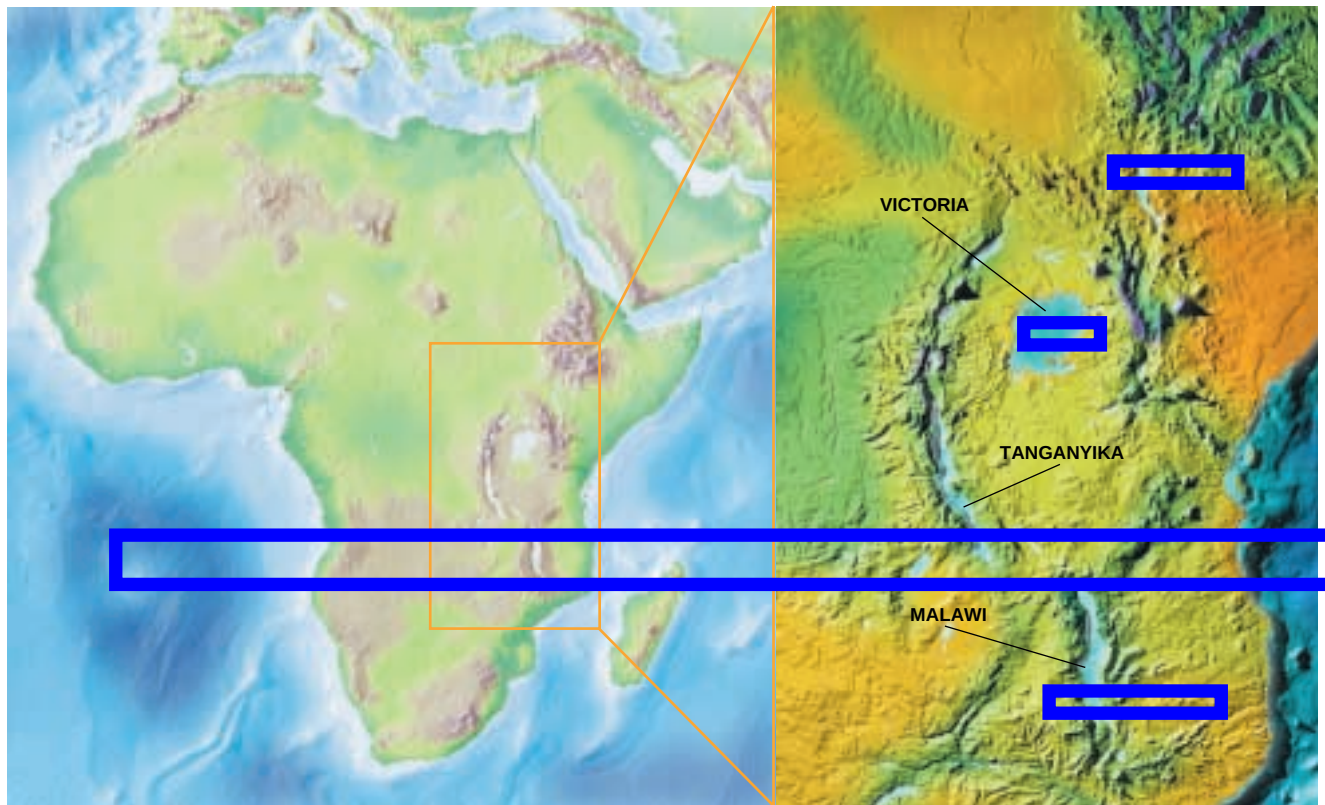
les abris rocheux. Parfois, des bancs de sable de quelques centaines de mètres de large séparent les blocs de rochers ; la traversée est trop risquée pour ces petits poissons, de sorte que les amas rocheux dispersés sont aux *Tropheus* ce que les îles Galápagos sont aux pinsons de Charles Darwin : des régions isolées, propices aux évolutions divergentes. Dans une zone rocheuse, on rencontre ainsi des *Tropheus* noirs avec des bandes verticales jaunes et, dans une autre, des poissons identiques, mais avec des bandes blanches et bleues. Au total, une centaine de ces différentes formes colorées a été recensée. Néanmoins, elles sont toutes étroitement apparentées.

Tous de la même famille

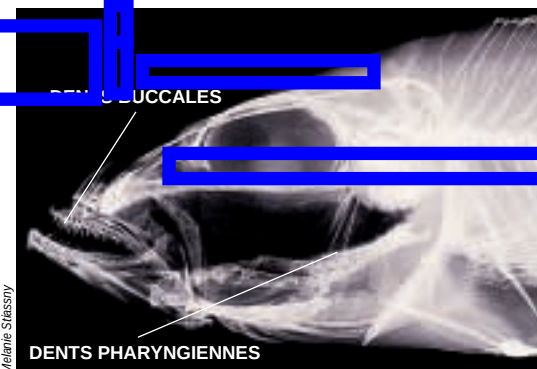
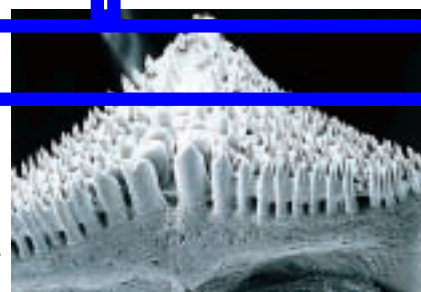
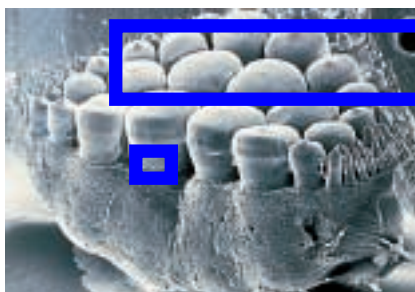
Les cichlidés sont des poissons d'eau douce aux nageoires rayonnées, c'est-à-dire munies de segments rigides parallèles. Leurs couleurs, leurs formes et leurs comportements sont variés. Ils sont indigènes des rivières et des lacs chauds d'Afrique, de Madagascar, du Sud de l'Amérique du Sud, d'Amérique centrale ; une seule espèce (le cichlidé du Texas) vit en Amérique du Nord. Ces régions, à l'exception de la dernière, appartiennent au Gondwana, l'ancien continent austral qui s'est fragmenté il y a 180 millions d'années. La répartition géographique de cette famille indique probablement son origine ancienne.

L'une d'entre nous (M. Stiassny) a identifié 15 espèces de cichlidés, à Madagascar, et trois espèces, dans le Sud de l'Inde, qui sont sans doute les survivants de populations ancestrales. Ils ont évolué indépendamment des populations d'Afrique. Environ 300 espèces vivent en Amérique du Sud et en Amérique centrale. Toute la famille est présente en Afrique et, notamment, dans les grands lacs d'Afrique de l'Est : Victoria, Malawi et Tanganyika (voir la figure 2).

Le lac Victoria est une cuvette grande comme l'Irlande, qui contient plus de 400 espèces de cichlidés ; sa formation date d'environ 500 000 ans. Les lacs Malawi et Tanganyika sont



2. LES LACS TANGANYIKA, MALAWI ET VICTORIA, en Afrique de l'Est, sont ceux dont les espèces de cichlidés sont le plus variées. Toutefois, les cichlidés sont également présents dans les eaux chaudes de la plus grande partie du Globe.



3. LES DENTS DE *CICHLASOMA CITRINELLUM* prennent la forme de pointes aiguës (a) ou de plaques broyeuses (b). La radiographie (c) montre les deux séries de dents des cichlidés.

étroits et très profonds, car ils remplissent le fossé d'effondrement entre les plaques tectoniques d'Afrique de l'Est et d'Afrique centrale. Le lac Malawi, formé il y a environ quatre millions d'années, compte 300 à 500 espèces de cichlidés, tandis que le lac Tanganyika, âgé de 12 millions d'années, en comprend près de 200. Malgré l'ancienneté de la famille des cichlidés et de leurs lacs d'origine, la diversité de ces poissons n'est apparue que ces derniers millions d'années.

L'anatomie des cichlidés est l'un des nombreux facteurs qui expliquent leur diversité. Ils ont deux séries de dents, l'une dans la bouche (dents buccales), pour saisir, mâcher, broyer la nourriture, et l'autre dans le pharynx (dents pharyngiennes), pour écraser, émincer ou transpercer le morceau avant de l'ingérer (voir la figure 3). Les cichlidés sont les seuls poissons d'eau douce à posséder cette seconde série de dents, qui a évolué à partir des arcs branchiaux (les os qui soutiennent les branchies).

Ces deux séries de dents sont extrêmement variables et adaptables : l'un d'entre nous (A. Meyer) a montré qu'elles changent de forme au cours de la vie des poissons. Elles peuvent être pointues et perforantes, les dents deviennent broyeuses et plates. Comme la morphologie des cichlidés varie selon leur régime alimentaire, chaque espèce est adaptée à sa niche écologique. Ainsi, des centaines d'espèces coexistent sans être en compétition ; avec des ressources identiques, la plupart d'entre elles auraient disparu.

Les cichlidés mangeurs d'écailles illustrent l'une de ces spécialisations alimentaires. Le lac Tanganyika abrite sept de ces espèces, mais ces poissons du genre *Perissodus* sont présents dans les trois grands lacs d'Afrique de l'Est. Ils approchent d'autres cichlidés par l'arrière et râpent quelques écailles de leurs flancs. Michio Hori, de l'Université de Kyoto, a découvert deux formes différentes chez les *Perissodus microlepis* mangeurs d'écailles : certains ont la tête et le corps courbés vers la gauche, d'autres vers la droite. Ces poissons se nourrissent uniquement d'écailles d'un seul côté de leurs proies : les poissons «gauchers» attaquent le flanc droit de leurs victimes, et les «droitiers» le flanc gauche. Cette asymétrie morphologique favorise probablement l'arrachage d'écailles. Ces dernières, riches en protéines, sont

empilées par les dents pharyngiennes avant d'être ingérées.

Les victimes sont attaquées de chaque côté. Lorsque les mangeurs d'écailles «gauchers» sont plus nombreux que les «droitiers», les victimes protègent davantage leur flanc droit : les «droitiers» sont alors avantagés, et leur population augmente. L'équilibre entre les populations de «droitiers» et de «gauchers» est ainsi maintenu.

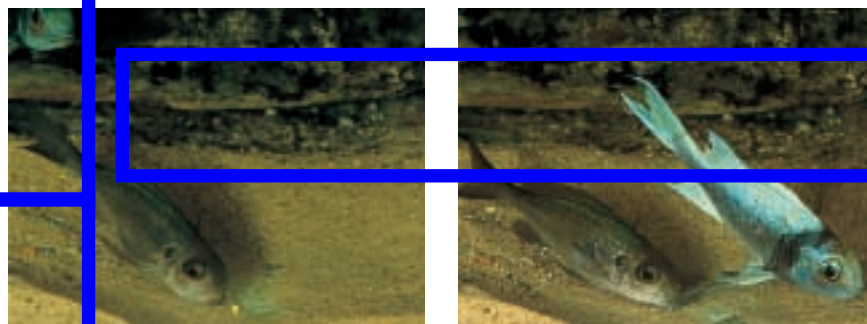
Le mode de reproduction est un autre facteur de diversification. On rencontre des cas de polygamie, de polygynie et de polyandrie. Les cichlidés consacrent plus de temps et d'énergie à leurs jeunes que toute autre espèce de poisson. Ils s'occupent de leur progéniture longtemps après l'éclosion, et cette longue association entre parents et enfants nécessite une communication élaborée. Alors qu'un seul parent suffit à surveiller les œufs fécondés, les deux

parents sont requis dès que la progéniture devient mobile. Cette attention soutenue est la cause des comportements reproductifs.

De nombreux cichlidés gardent dans la bouche les œufs fécondés ou les jeunes : ils offrent un abri sûr où les jeunes se réfugient en cas de danger. En outre, les parents protègent les algues ou en ingérant d'autres nourritures pour leur propre compte, nourrissent les jeunes à l'intérieur de leur bouche. Tout le coucou, de nombreuses espèces de cichlidés glissent leurs œufs fécondés dans la bouche d'un parent.

La progéniture d'autres parents cichlidés et se débarrassent ainsi des contraintes de la surveillance.

Les poissons incubateurs buccaux pondent peu d'œufs, parfois moins de dix, et ils investissent beaucoup de temps et d'énergie par portée. De plus, la population totale d'une espèce est souvent réduite à quelques centaines



4. CHEZ *OPHTALMOTILAPIA VENTRALIS*, la femelle libère un ovule et le prend dans sa bouche pour le protéger (à gauche). Au même endroit, le mâle libère du sperme qui ressemble à l'ovule (à droite, la tache jaune à l'extrémité de la nageoire ventrale). La femelle tente aussi de le ramasser. Elle avale ainsi le sperme qui féconde les œufs conservés dans sa bouche.



5. L'INCUBATION BUCCALE est une stratégie efficace pour la survie des jeunes. Cette femelle *Nimbochromis livingstonii*, du lac Malawi, récupère ses jeunes quand un danger menace.

de poissons vivant dans une même zone. Une mutation à l'origine de la différenciation d'une espèce se propage plus rapidement dans une petite population que dans une grande. Par conséquent, la taille limitée des populations, favorisée par l'incubation buccale, a pu contribuer à la diversification rapide des cichlidés.

Dans les lacs d'Afrique de l'Est, les mâles des espèces à incubation buccale ne sont pas seulement colorés. Cependant, ils rivalisent pour fertiliser le plus d'œufs possible. Par exemple, ils forment parfois des rassemblements où ils parodent pour attirer les femelles. Un rassemblement compte 20 à 50 mâles, mais, chez certaines espèces, on a observé des groupes de plus de 50 000 individus. D'autres mâles, tels les *Ophthalmotilapia*, vivement colorés,

construisent un nid élaboré au-dessus duquel ils s'exhibent à la vue des femelles. Les mâles peuvent déplacer 300 grammes jusqu'à près de 10 kilogrammes de sable et de graviers pour construire un nid. Lorsqu'une femelle a pondu quelques œufs dans un nid souvent le plus grand, le mâle les féconde rapidement ; la femelle prend alors les œufs dans sa bouche et continue sa nage, à la recherche d'un

Alors que les femelles cichlidées ont souvent une couleur terne (grise ou marron), les mâles sont vivement colorés. Les diverses nuances sont probablement la conséquence d'une sélection sexuelle plutôt que de la pression pour la survie physique qui semble avoir gouverné la diversification. Des couleurs différentes empêchent la reproduction de

poissons par ailleurs identiques et marquent ainsi des frontières entre des populations distinctes.

Les secrets des gènes

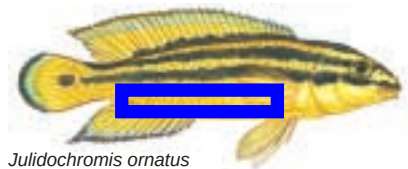
Quels liens de parenté unissent les centaines d'espèces de cichlidés ? Les études de génétique moléculaire ont confirmé de nombreuses hypothèses fondées sur l'anatomie, mais elles ont souvent, bousculé des idées établies.

L'hypothèse de Mutsumi Nishida, de l'Université de Fukui, a été ainsi confirmée : les lignées primitives de cichlidés d'Afrique de l'Ouest ont tout d'abord colonisé le lac Tanganyika. La diversité génétique des cichlidés de ce lac ancien montre qu'ils dérivent de 11 espèces ancestrales. Certains de ces poissons ont ensuite quitté le lac et envahi le réseau fluvial d'Afrique de l'Est, par lequel ils ont atteint les lacs Victoria et Malawi. L'étude de l'ADN mitochondrial, effectuée par l'équipe de l'un d'entre nous (A. Meyer), a montré que les cichlidés du lac Victoria sont génétiquement plus proches les uns des autres que des cichlidés des deux autres lacs dont la morphologie est pourtant similaire (les mitochondries sont les organes intracellulaires qui assurent la respiration des cellules). Les cichlidés du lac Victoria proviennent presque tous d'une seule lignée à incubation buccale.

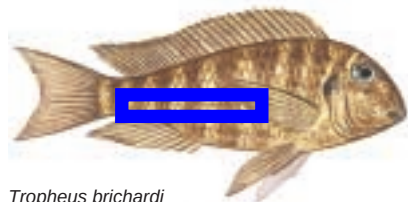
Ce scénario indique que des adaptations similaires sont apparues plusieurs fois indépendamment : les trois lacs hébergent des cichlidés qui présentent des caractères anatomiques singuliers, tels ceux nécessaires pour se nourrir de mollusques, de larves, pour couper les nageoires, racler les algues, arracher les écailles, écraser les mollusques... Ce résultat est important car de nombreux biologistes admettaient que ces caractères exceptionnels étaient peu susceptibles d'apparaître plus d'une fois : les poissons présentant la même spécialisation semblaient apparentés.

Ainsi, on croyait que l'aptitude à racleur le bryozoaire n'apparaît qu'une seule fois, et que la population de racleurs d'algues s'était dispersée ultérieurement. En fait, les racleurs d'algues des lacs Victoria et Malawi ont évolué indépendamment de ceux du lac Tanganyika, à partir d'un ancêtre qui ne possédait pas cette aptitude. Les mêmes solutions biologiques ont été mises en œuvre plusieurs fois,

ESPÈCES DU LAC TANGANYIKA



Julidochromis ornatus



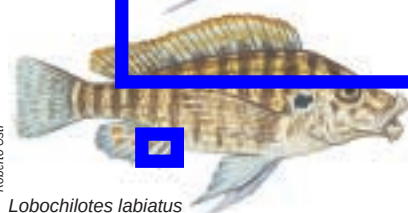
Tropheus brichardi



Bathybates ferox



Cyphotilapia antosa



Lobochilotes labiatus

ESPÈCES DU LAC MALAWI



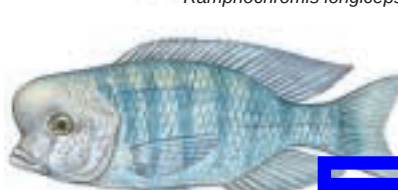
Melanochromis auratus



Pseudotropheus microstoma



Ramphochromis longiceps



Cyrtocara moorii



Placidochromis milomo

6. DES CICHLIDÉS faiblement apparentés des lacs Tanganyika et Malawi sont devenus semblables en occupant des niches écologiques similaires. Tous les cichlidés du lac Malawi sont plus étroitement apparentés entre eux qu'ils ne le sont aux cichlidés du lac Tanganyika. Les ressemblances morphologiques ne sont parfois que faiblement corrélées à la parenté génétique ou à la lignée évolutive.

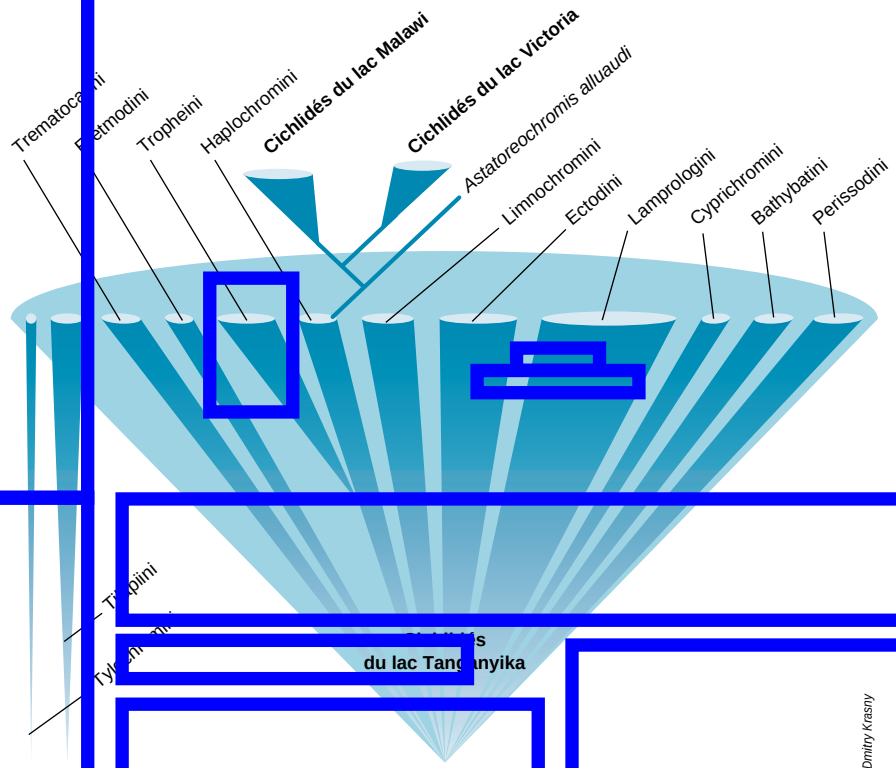
quand les contraintes écologiques étaient identiques.

De surcroît, on observe que certaines caractéristiques morphologiques ont évolué à un rythme très irrégulier, et parfois indépendamment des modifications génétiques. Quelques espèces du lac Tanganyika se sont très peu transformées et ressemblent encore beaucoup aux cichlidés fossilisés, en particulier aux tilapias. Par exemple, la morphologie des *Tropheus*, à l'exception des couleurs, n'a presque pas changé. En revanche, les cichlidés du lac Victoria

ont une grande diversité de tailles, de motifs et de formes, ont évolué en un temps très court. Il y a plus de variations génétiques au sein de la seule espèce *Homo sapiens* qu'il n'y en a entre les 400 espèces de cichlidés du lac. Les analyses génétiques indiquent que les différents cichlidés du lac Victoria sont apparus pendant ces derniers 200 000 ans.

De récentes études paléoclimatologiques restreignent encore l'origine des cichlidés du lac Victoria : le lac semble s'être asséché presque complètement il y a moins de 14 000 ans. Seuls quelques individus ont survécu : les cichlidés de ce lac présentent un taux de spéciation inégalé chez les autres vertébrés. De plus, le lac Nabugabo, séparé au Nord-Ouest du lac Victoria par un banc de sable et âgé au maximum de 1 000 ans, abrite une dizaine d'espèces de cichlidés endémiques. Ces poissons sont probablement apparentés à ceux du lac Victoria, mais les mâles présentent des livrées nuptiales différentes. Sec il y a seulement 200 ans, le Sud du lac Malawi est cependant habité par de nombreuses espèces et formes colorées que l'on ne rencontre nulle part ailleurs.

Les résultats des récentes analyses d'ADN de poissons provenant du lac Tanganyika corroborent ces exemples et indiquent que les isollements répétés sont à l'origine de la spéciation des cichlidés. Les baisses successives du niveau du lac Tanganyika, qui ont parfois atteint 600 mètres, ont favorisé l'apparition de nouvelles espèces de *Tropheus* et de tous les autres cichlidés vivant dans les rochers. Les populations habituées à échanger des gènes ont alors été isolées dans de petites poches d'eau. Elles ont évolué indépendamment et, lorsque le niveau d'eau est remonté, les populations sont à nouveau entrées en contact, mais elles n'étaient alors plus interfécondes.



7. CET ARBRE PHYLOGÉNÉTIQUE montre que les cichlidés des lacs Malawi et Victoria descendent probablement d'une seule lignée d'incubateur de buccaux (*Haplochromini*) qui s'est échappée du lac Tanganyika. Les cichlidés de ce dernier, le plus ancien, montrent la plus grande diversité génétique. La section des cônes est approximativement proportionnelle au nombre d'espèces par groupe.

Un record plus sombre

La vitesse des extinctions d'espèces dans le lac Victoria est également très importante. Il y a 50 ans, les cichlidés constituaient plus de 99 pour cent de la faune ichthyologique du lac.

Aujourd'hui, il ne reste que quelques dizaines de pour cent. La plupart des espèces sont déjà éteintes, et beaucoup d'autres ont des populations si réduites que leurs chances de survie sont faibles.

Ces extinctions massives sont la conséquence de la destruction de l'habitat, de l'introduction de nouvelles espèces, de la pollution, de la croissance démographique et de la surexploitation.

Par exemple, dans les années 1950, l'introduction de la perche du Nil, afin d'augmenter les rendements de la pêche a divisé, en 30 ans, la population de

cichlidés d'un facteur 10 000. Un grand nombre de cichlidés que les perches chassaient se nourrissaient d'algues. En leur absence, les algues mortes se sont accumulées et se sont décomposées : l'oxygène s'est raréfié dans l'eau, et la plus grande partie du lac est devenue anoxique. De plus, des perches d'environ dix mètres ne sèchent pas de la même manière que les petits cichlidés ; elles doivent être fumées. La déforestation a provoqué l'entraînement du sol dans le lac, par le ru de pluie, ce qui a augmenté la turbidité et des conditions anoxiques.

Une communauté autrefois prospère est aujourd'hui extrêmement réduite. L'extraordinaire théâtre évolutif des cichlidés du lac Victoria est en passe de se fermer plus vite qu'il ne s'est ouvert.

Melanie STIASSNY dirige le département d'ichtnologie du Muséum américain d'histoire naturelle. Axel MEYER est professeur de biologie à l'Université de Göttinge.

Michio HORI, *Frequency-Dependent Natural Selection in the Handedness of Scale-Eating Cichlid Fish*, in *Science*, vol. 260, pp. 216-219, 9 avril 1993.

A. MEYER, *Phylogenetic Relationships and Evolutionary Processes in East African*

Cichlid Fishes, in *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 8, n° 8, pp. 275-284, août 1993.

Tijs GOLDSCHMIDT, *Darwin's Dreampond : Drama in Lake Victoria*, traduction de Sherry Marx-Macdonald, MIT Press, 1996.

Melanie L.J. STIASSNY, *An Overview of Freshwater Biodiversity : With Some Lessons from African Fishes*, in *Fisheries*, vol. 21, n° 9, pp. 7-13, septembre 1996.

Les sources de rayonnement X mou

PETER NOUBERT • LEONARD VAN DEN HEUVEL • SAUL RAPPAPORT

Des systèmes d'étoiles doubles où une naine blanche arrache les couches externes de son compagnon sont à l'origine de phénomènes variés, de l'émission intense de rayonnements X de faible énergie à des explosions de supernovae.

Depuis les années 1930, les astronomes savent que la lumière des étoiles est produite par la fusion nucléaire. Ainsi, au centre du Soleil, 600 millions de tonnes d'hydrogène se transforment chaque seconde en hélium. Cette réaction dégage de l'énergie sous forme de rayonnements X et gamma, qui diffusent vers la surface, travers d'épaisses couches de gaz, où ils sont partiellement transformés en lumière visible.

Récemment, on a découvert une nouvelle catégorie d'étoiles où la fusion nucléaire ne se déroule pas dans le cœur, mais dans les couches externes. Ces étoiles sont des naines blanches (des étoiles denses ayant épuisé leur carburant nucléaire) en orbite autour d'étoiles ordinaires : la naine blanche attire le gaz des couches externes de son compagnon, et, quand l'hydrogène accumulé en surface est suffisamment comprimé, la fusion commence. Il en résulte une émission de rayonnement X « mou », c'est-à-dire de relativement faible énergie. En prenant du poids, ces naines blanches deviennent parfois instables, se contractent, s'échauffent et deviennent encore plus denses, ou explosent.

Par ailleurs, on supposait depuis longtemps que les supernovae de type Ia étaient des explosions de naines blanches. Les sources de rayonnement X mou sont les premiers systèmes stellaires dont on sache qu'ils engendrent de telles explosions. Comme la luminosité des

supernovae de type Ia est utilisée comme référence pour la mesure des distances des galaxies lointaines, la mesure de la vitesse de l'expansion cosmique et l'analyse des sources de rayons X nous devrait préciser l'âge et la vitesse d'expansion de l'Univers.

Un satellite pour les mous

L'histoire des sources de rayonnement X mou a commencé avec le lancement du satellite allemand *ROSAT*, en 1990. Cet observatoire en orbite autour de la Terre a dressé la première carte complète du ciel en rayonnement X mou, domaine du spectre électromagnétique compris entre le rayonnement ultraviolet et le rayonnement X dur, où l'énergie des photons est comprise entre 100 et 2 500 électronvolts. Excepté l'Observatoire Einstein de la NASA et un instrument de l'Observatoire européen *EXOSAT*, qui couvraient la gamme d'énergies de 200 à 4 000 électronvolts, tous les satellites précédents équipés de détecteurs X observaient dans une gamme de rayonnement X dur, d'énergie supérieure.

L'équipe de *ROSAT* a rapidement découvert que les sources X moues dans le Grand Nuage de Magellan, petite galaxie satellite de la Voie lactée : ces astres émettaient un rayonnement X très intense (leur puissance était 5 000 à 20 000 fois supérieure à celle du Soleil), mais à des énergies anormalement basses. Les sources de rayonnement X brillantes ont, en général, des spectres durs, dont les intensités

sont réparties entre 1 000 et 20 000 électronvolts. Ces rayons X sont produits par des gaz chauffés à des températures de 10 millions à 100 millions de kelvins. On les trouve pondant à des systèmes doubles : une étoile à neutrons ou un trou noir arrachent les couches externes de l'autre étoile. Or, les spectres observés des nouvelles étoiles, à des énergies inférieures à celles des autres sources X brillantes, corresponaient à des températures de quelques centaines de milliers de kelvins seulement.

En fait, après les découvertes de *ROSAT*, les recherches dans les archives ont révélé que les sources X moues avaient été découvertes dix ans auparavant à l'aide de l'Observatoire Einstein. Ces sources, nommées CAL 83 et CAL 87, avaient été classées avec les autres sources X brillantes du Grand Nuage de Magellan, malgré la mollesse de leur rayonnement X et de leurs spectres.

À l'époque, des astrophysiciens avaient supposé que CAL 83 et CAL 87 étaient des systèmes doubles où un trou noir



1. UNE NAINE BLANCHE en orbite autour d'une géante rouge forme un système double symbiotique. En raison de sa forte attraction gravitationnelle, la naine blanche attire les couches externes de la géante rouge. Le gaz ainsi capté forme un disque autour de la naine blanche et finit par tomber à sa surface, où il peut subir une fusion nucléaire. Il émet alors un rayonnement X de faible énergie, mais de grande intensité.

absorbait le gaz dont était constitué l'autre étoile : les trous noirs émettent généralement des rayons X de plus basse énergie que les étoiles à neutrons dans des systèmes doubles. Cette hypothèse fut corroborée dans les années 1980 par la découverte d'étoiles qui émettaient une faible lumière visible, à l'endroit des deux sources. L'éclat des étoiles oscillait, ce qui est caractéristique d'un système double : en orbite l'une autour de l'autre, les étoiles s'occultent périodiquement. Ces étoiles visibles pouvaient donc alimenter en gaz les trous noirs autour desquels elles auraient été en orbite. Les périodes d'oscillation de l'éclat de ces étoiles ont été mesurées en 1988 : un peu plus d'un jour pour CAL 83, et 11 heures pour CAL 87. Les diverses mesures indiquaient des masses de 1,2 à 2,5 fois celle du Soleil.

Les observations de ROSAT remettaient tout fois cette explication en question. Les sources de rayonnement X de faible énergie étaient beaucoup plus froides que n'importe quel système double à trou noir connu. En outre, comme les étoiles émettent une puissance proportionnelle à leur température à la puissance quatre, on peut calculer la surface d'une étoile (et, en supposant qu'elle est sphérique, son diamètre) en divisant l'émission totale de l'étoile par cette énergie : on a ainsi déterminé que CAL 83, CAL 87 et les sources de rayonnement X de Magellan ont des diamètres de 10 000 à 20 000 kilomètres. Cette taille, qui conviendrait à une naine blanche, est 500 à 1 000 fois supérieure à celle d'une étoile à neutrons ou à l'horizon d'un trou noir de la masse d'une étoile.

Des naines rayonnantes

Deux autres modèles ont alors été proposés. Certains ont supposé que ces sources de rayonnement X étaient des naines blanches qui arrachaient les couches externes d'une étoile compagne, et qui émettaient un rayonnement X quand ce gaz s'écrasait sur leur surface. D'autres pensaient que ces sources étaient des étoiles à neutrons entourées d'une

enveloppe gazeuse de 10 000 kilomètres d'épaisseur. Dans ce cas, la gravité fournissait l'énergie nécessaire à l'émission du rayonnement X : le champ gravitationnel de la naine blanche ou de l'étoile à neutrons captait la matière du compagnon, et l'énergie cinétique de cette matière est transformée en chaleur et en rayonnement lors des collisions avec la surface ou au sein du gaz.

Toutefois, l'analyse détaillée montra qu'aucune de ces deux explications ne convenait. Les sources de rayonnement X de faible énergie émettent à peu près avec la même intensité que les étoiles à neutrons qui arrachent les couches externes d'une étoile compagne. Pourtant la collision d'un volume de gaz de 10 000 kilomètres cubes libère 500 à 1 000 fois plus d'énergie que la chute d'un même volume avec une naine blanche à la surface de laquelle la gravité est inférieure. L'énergie potentielle de gravitation à la surface d'une étoile de masse donnée est inversement proportionnelle à son rayon. Donc, pour qu'une naine blanche mette avec la même intensité

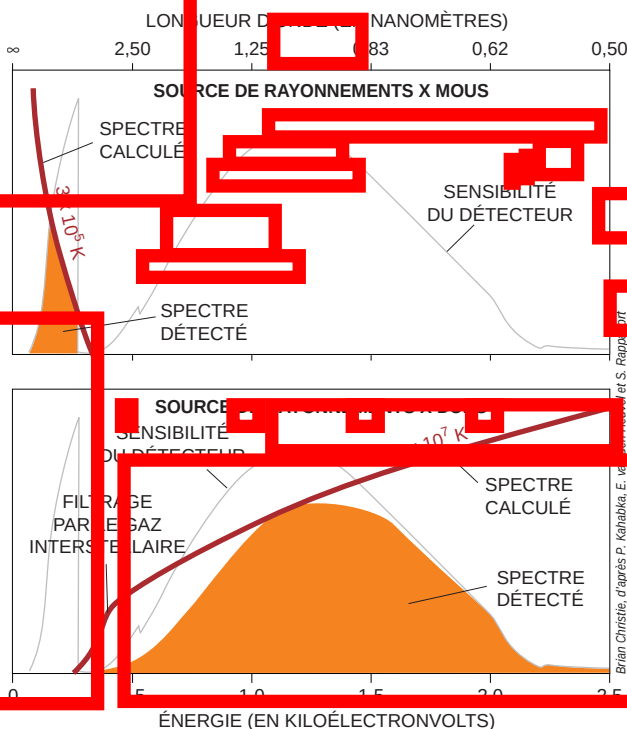
qu'une étoile à neutrons, elle devrait libérer 500 à 1 000 fois plus de matière par unité de temps. Un tel flot de gaz, dont la masse serait plusieurs fois celle de la Terre par an, serait si dense qu'il absorberait tout le rayonnement X émis.

D'autre part, d'énormes enveloppes de gaz, de 10 000 kilomètres de diamètre, autour d'étoiles à neutrons d'une dizaine de kilomètres de diamètre seraient instables : elles s'effondreraient et, éventuellement, seraient expulsées par l'onde de choc engendrée par l'effondrement en quelques minutes, voire en quelques secondes. Or, on voit briller CAL 83 et CAL 87 depuis dix ans, et l'on a calculé que la nébuleuse de gaz ionisé qui entoure CAL 83 s'est formée en plusieurs dizaines de milliers d'années.

Les astrophysiciens ont alors compris que la chute de l'hydrogène sur une étoile à neutrons ou dans un trou noir libère beaucoup de la chute sur une naine blanche. Dans le premier cas, la collision dégage plus d'énergie que la fusion nucléaire de la même quantité d'hydrogène, tandis que, dans le second cas, elle en dégage moins. La fusion libre ne libère que 0,7 pour cent de l'énergie contenue dans la masse (selon la célèbre relation $E = mc^2$, où E est l'énergie, m la masse et c la vitesse de la lumière). La chute sur une étoile à neutrons ou dans un trou noir en libère respectivement 10 et 46 pour cent, tandis que la chute d'hydrogène sur une naine blanche en libère qu'environ 0,03 pour cent de l'énergie contenue dans la masse.

Si l'hydrogène fusionne après la chute sur une naine blanche, l'énergie émise sous forme de rayonnement sera donc bien visible, tandis qu'elle passerait inaperçue dans le spectre d'une étoile à neutrons ou d'un trou noir. Si de l'hydrogène s'accumule à la surface d'une naine blanche et que la fusion nucléaire commence, une masse équivalente à

0,03 fois celle de la Terre par an ne suffit à rendre compte de la luminosité du rayonnement X de faible énergie que l'on observe. Comme le flot de gaz incident est peu dense, le rayonnement X le traverse sans difficulté et parvient jusqu'à nous.



2. LES SOURCES DE RAYONNEMENT X MOUS ET DURS se distinguent par leur spectre. Les sources de rayonnements X mous (en haut) émettent des rayonnements X d'énergies relativement faibles, car leur température est basse : 300 000 kelvins. Les sources caractéristiques de rayonnements X durs (en bas) sont 100 fois plus chaudes ; elles émettent des rayonnements X d'énergie supérieure. Dans les deux cas, le spectre intrinsèque de la source (courbes rouges) est déformé par le détecteur du satellite ROSAT (courbes grises) et par l'absorption due au gaz interstellaire.

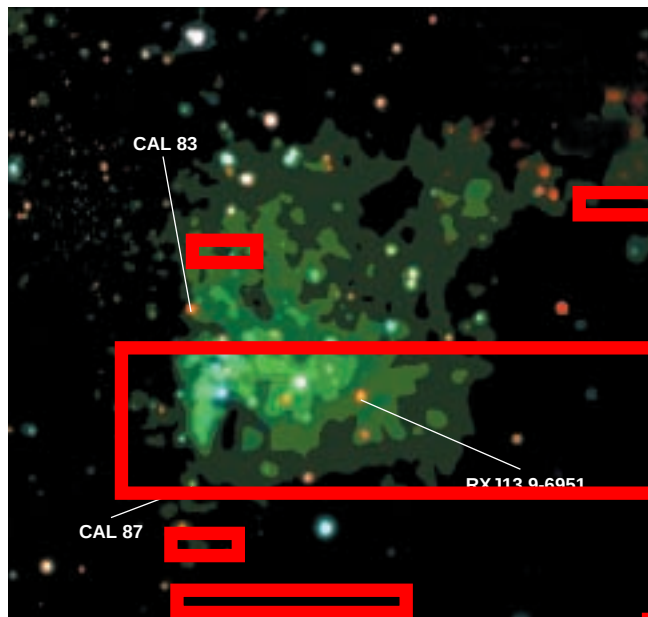
Des naines explosives?

La fusion nucléaire stable du gaz arraché par une naine blanche à une étoile compagne pouvait expliquer la brillance des sources de rayonnement X mou. Était-ce la bonne explication? Ken'ichi Nomoto, de l'Université de

Tokyo, se posait la même question à propos d'un autre phénomène, les novae, au cours duquel la luminosité d'une étoile est brusquement multipliée par 10 000 sans que l'étoile soit détruite. Les novae apparaissent toujours dans des systèmes doubles serrés, constitués d'une naine blanche et d'une étoile de

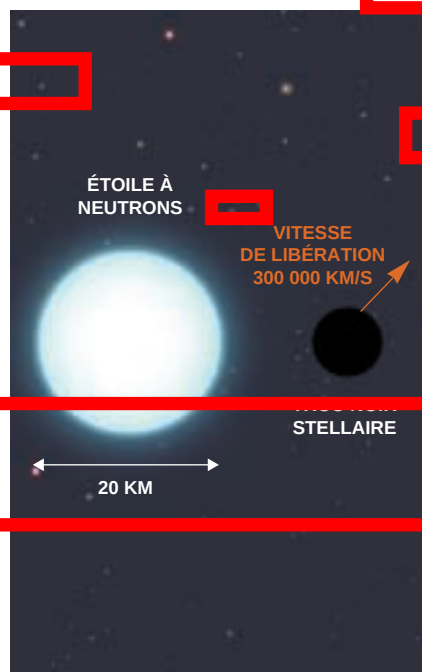
type solaire. Ces systèmes binaires serrés étaient les seuls connus pour faire éventuellement des novae jusqu'à la découverte des sources de rayonnement X de basse énergie.

Depuis plus de dix ans, K. Nomoto et d'autres perfectionnaient des simulations de la fusion de l'hydrogène



3. LE GRAND NUAGE DE MAGELLAN, une galaxie satellite de la nôtre, contient des sources de rayonnement X faibles (à gauche, en fausses couleurs, l'énergie du rayonnement X varie du rouge au bleu). Les sources de rayonnement X de faible énergie sont des points rouges ou orange, tandis que les sources de rayonnements X durs sont bleues. La source de rayonnements X

de faible énergie CAL 87 apparaît en vert, parce qu'un nuage d'hydrogène placé dans la ligne de visée modifie son émission. Certains points rouges sont en fait des étoiles de type solaire situées entre le Grand Nuage de Magellan et la Terre. L'image en rayonnement X est différente d'une photographie de la même région en lumière visible (à droite).



4. LES ÉTOILES DENSES ont des vitesses de libération considérables. Pour échapper à l'attraction gravitationnelle d'une naine blanche qui aurait la masse du Soleil dans le volume de la Terre (à gauche), un objet doit voyager à environ 6 000 kilomètres par seconde. Un objet qui tombe sur la naine blanche a environ cette même vitesse

au moment de l'impact. Les étoiles plus denses, telles les étoiles à neutrons (au centre), exercent une attraction encore plus forte. L'étoile la plus dense possible, un trou noir, est définie par une surface, un «horizon», où la vitesse de libération est égale à la vitesse de la lumière (à droite).

accumule à la surface d'une naine blanche. Le mode de combustion dépend de la vitesse d'accumulation du gaz. Cette vitesse est d'environ 0,003 fois la masse de la Terre par an, la fusion a lieu par à-coups : l'hydrogène reste inerte et s'accumule, souvent pendant des milliers d'années, jusqu'à ce que sa masse atteigne une valeur critique ; la fusion commence alors à la base de la couche. L'énergie libérée expulse les couches externes : cette explosion est une nova.

Quand la vitesse d'accumulation est un peu supérieure, la fusion devient cyclique et elle n'est plus explosive. Puis, plus la vitesse d'accumulation augmente, les cycles de combustion sont rapprochés. Au-dessus d'une vitesse limite, la fusion est permanente (pour des naines blanches de la masse du Soleil, la limite est d'environ 0,03 fois la masse de la Terre par an). Dans les simulations, la fusion engendre exactement la luminosité observée pour les sources de rayonnement X mou.

Si la vitesse d'accumulation du gaz est supérieure à 0,12 fois la masse de la Terre par an, le gaz ne s'accumule pas à la surface de la naine blanche : il l'entoure d'une enveloppe étendue. À la surface de l'étoile, une réaction de fusion stable a lieu, mais l'enveloppe épaisse dégrade le rayonnement X en rayonnement ultraviolet et visible. Le rayonnement est par ailleurs si intense que sa pression souffe une partie du gaz de l'enveloppe dans un vent stellaire.

Si la vitesse d'accumulation fluctue autour de 0,12 fois la masse de la Terre par an, le système peut alterner entre des phases d'émission de rayonnement X et des phases de rayonnement visible. Un tel comportement a été observé dans la source de rayonnement X supermou RXJ0513.9-6951, dont les épisodes d'émission X durent plusieurs semaines et sont entrecoupés d'arrêts de plusieurs mois. Ces allumages et ces extinctions ont intrigué les astronomes jusqu'à ce qu'ils remarquent que la luminosité de cette étoile fluctue

aussi aux longueurs d'onde visibles. Quand la luminosité est faible aux longueurs d'onde visibles, elle est forte aux longueurs d'ondes X, et réciproquement (voir la figure 5).

Cette étoile émet aussi deux jets de matière (à une vitesse comprise entre 4 000 et 6 000 kilomètres par seconde), dans des directions opposées. De tels jets sont fréquents pour les étoiles entourées d'un disque de matière : ils jaillissent dans une direction perpendiculaire au disque, pour le bloquer, à une vitesse proche de la vitesse de libération à la surface de l'étoile. La vitesse de la matière dans les jets de RXJ0513.9-6951 est effectivement proche de la vitesse de libération d'une naine blanche : c'est une confirmation supplémentaire que les sources de rayonnement X de faible énergie sont des naines blanches.

Tous les systèmes doubles n'échangent pas du gaz assez vite pour qu'ils produisent un rayonnement X mou. Si la masse de l'autre étoile est inférieure à celle de la naine blanche, ce que l'on observe dans la plupart des systèmes, le gaz se transforme en novae, la vitesse d'accumulation est d'environ 0,0003 fois

la masse de la Terre par an seulement (pour un compagnon de la masse du Soleil). Cette vitesse est réglée par le transfert de moment cinétique qui accompagne le transfert de masse à l'intérieur du système double (ce phénomène est celui qui permet à un patineur d'accroître sa vitesse de rotation : il rapproche ses bras du corps).

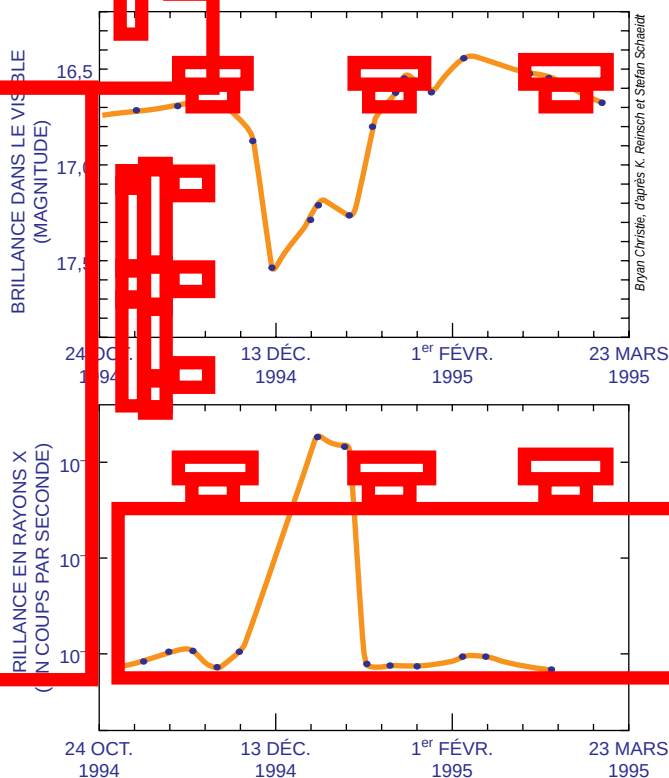
Lorsque la masse de l'étoile compagne est supérieure à celle de la naine blanche, la conservation du moment cinétique du système double provoque un rétrécissement de l'orbite à mesure que de la matière est échangée : la naine blanche, qui grossit, se rapproche du centre de gravité commun, et, à son tour, près du compagnon l'intérieur d'un volume nommé « lobe de Roche » les couches externes du compagnon sont attirées par la gravité de celui-ci (la

surface du lobe de Roche est l'ensemble des points où la gravité des deux étoiles se compense exactement). En revanche, le gaz situé au-delà du lobe de Roche est attiré par la naine blanche.

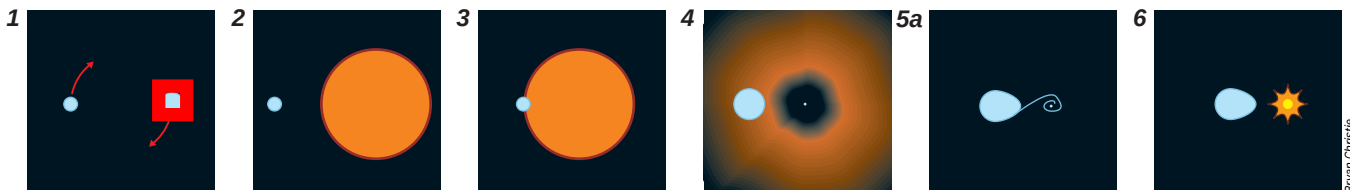
Une étoile autodestructrice

Le compagnon travaille à sa propre perte : bien qu'il perde de la masse en surface, la réaction de fusion qui a lieu dans son cœur continue à produire de l'énergie sous forme de rayonnement, et la pression de ce rayonnement sur les couches externes restantes les pousse en dehors du lobe de Roche, comme une casserole de soupe bouillante continue de déborder si l'on n'arrête pas d'en chauffer le fond. La situation ne se stabilise que lorsque la perte de masse fait suffisamment baisser la température au cœur de l'étoile pour que la fusion ralentisse, puis s'arrête. Pour une étoile dont la masse est initialement deux fois celle du Soleil, le retour à l'équilibre

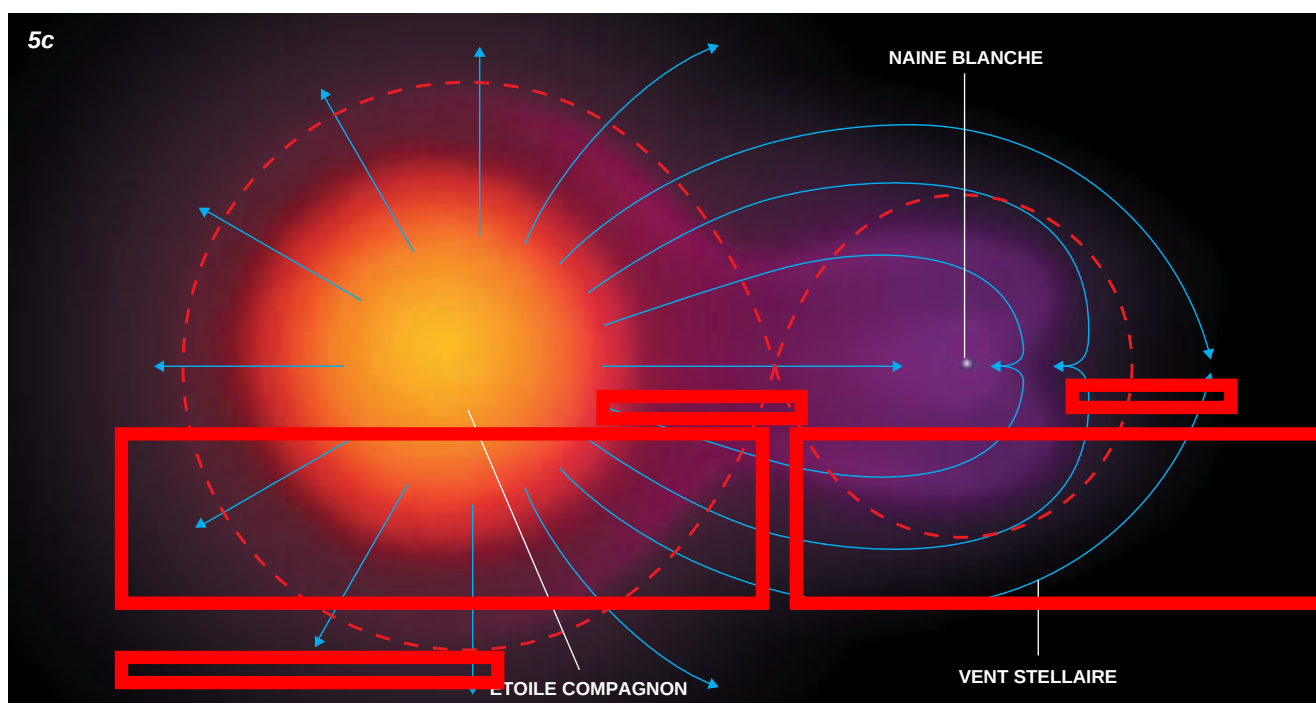
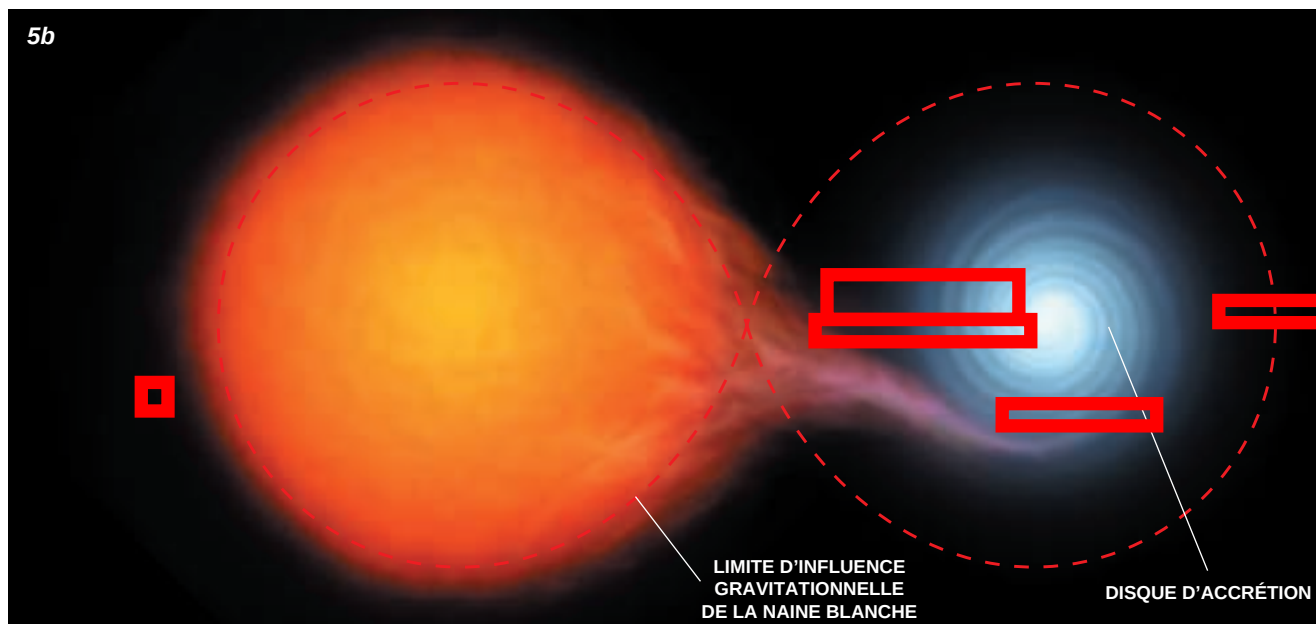
rayonnement X de faible énergie se produit après sept millions d'années. L'étoile ne contient alors plus qu'un cinquième de sa masse initiale ; elle est alors la moins massive du système double. Dans un tel système, la vitesse moyenne



5. LES EXTINCTIONS PÉRIODIQUES de l'étoile RXJ0513.9-6951 indiquent qu'elle oscille entre deux comportements. Quand elle brille en lumière visible (à gauche), son rayonnement X (à droite) est faible, et réciproquement. L'étoile est alternativement une source de rayonnements X de faible énergie et de rayonnement visible. Les changements de régime sont dus à de légères variations de la vitesse d'accumulation du gaz pris par la naine blanche à l'étoile compagne.



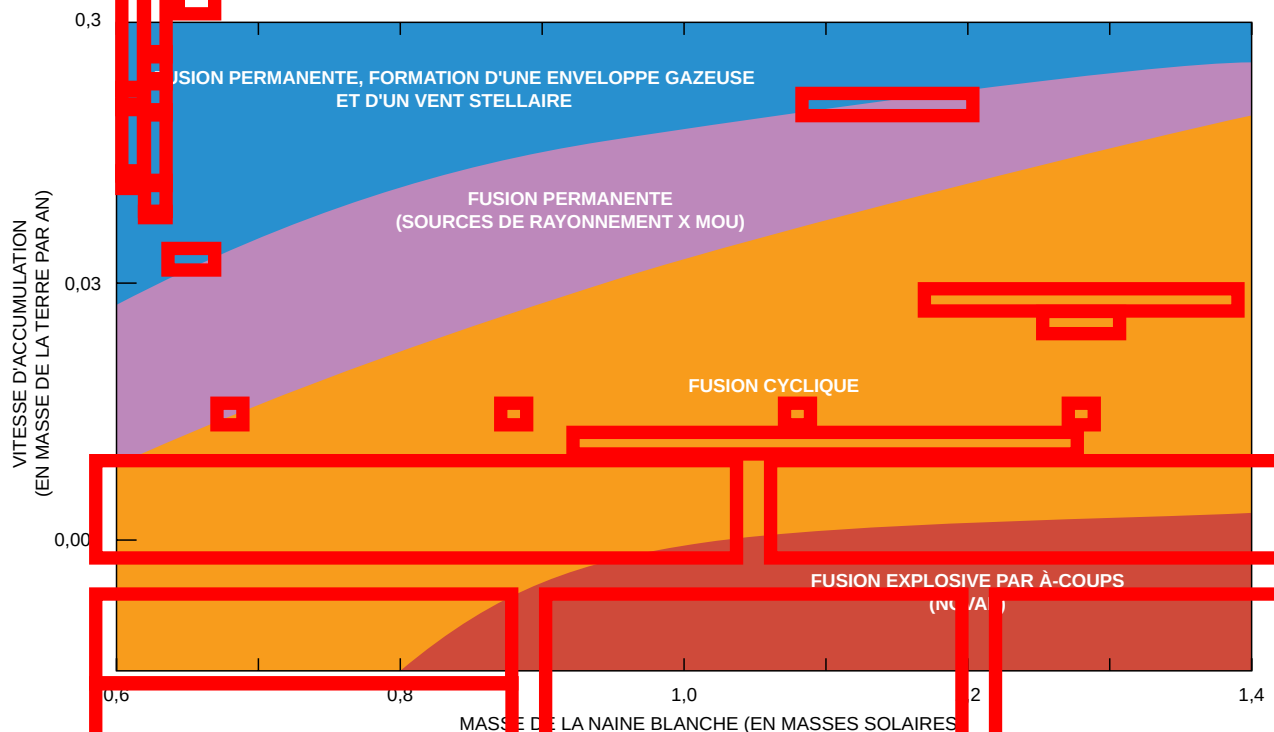
Bryan Christie



Alfred T. Kamajian

6. LE CYCLE DE VIE d'une source de rayonnement X de faible énergie (en haut) commence avec un système de deux étoiles de masses différentes et se termine par une explosion de supernova de type Ia. La phase d'émission de rayonnement X de faible énergie peut prendre trois formes, selon la nature du compagnon stellaire. Si ce dernier est une étoile ordinaire en orbite serrée, il peut céder ses couches externes à la naine blanche (5a). Si c'est une géante rouge

assez grande, ses couches externes sont aussi attirées par la naine blanche (5b). Enfin une géante rouge trop petite ou sur une orbite de trop grand diamètre alimente la source de rayonnement X de basse énergie par l'intermédiaire de ses vents stellaires puissants (5c). Toutes les sources de rayonnement X de faible énergie n'explosent pas, mais leur nombre peut être suffisant pour expliquer la fréquence des supernovae de type Ia que nous observons.



Bryan Christie, d'après Edo Iben, University of Illinois

7. LE RÉGIME DE LA FUSION NUCLÉAIRE à la surface d'une naine blanche dépend de la masse de cette naine blanche (axe horizontal) et de la vitesse à laquelle elle capte les couches externes de son compagnon (axe vertical). Si la vitesse d'accumulation est faible, la fusion se produit épisodiquement, de façon stable ou par explosions. Sinon, elle est permanente. Ce diagramme montre que des phénomènes autrefois considérés comme distincts, telles des novae et des supernovae, sont produits par des systèmes stellaires quasi identiques.

d'accumulation du gaz sur la naine blanche a été de 0,04 fois la masse de la Terre par an.

En utilisant ce modèle, nous avons prévu en 1991 que de nombreuses sources de rayonnement X de basse énergie sont des naines blanches en orbite serrée (avec des périodes inférieures à quelques jours) autour d'une étoile dont la masse était originellement de 1,2 à 2, masses solaires. CAL 83 et CAL 87 sont justement de tels systèmes. Les périodes orbitales de quatre autres sources de rayonnement X de basse énergie ont été mesurées depuis 1992 : toutes sont inférieures à quelques jours.

Le même comportement d'une classe de systèmes doubles de type nova, les étoiles du type de V Sagittae, dont la brillance oscillante a intrigué les astronomes depuis le début du siècle. En 1998, deux équipes ont démontré que ces étoiles ont la masse et la période orbitale appropriées. Elles sont donc des systèmes très lent, et la fusion est explosive.

Une autre catégorie de systèmes stellaires pourrait produire un rayonnement X de basse énergie : les systèmes doubles symbiotiques, où une naine blanche est en orbite autour d'une géante rouge, étoile de type solaire qui a brûlé presque tout son hydrogène, et qui cède facilement de la matière. Les couches

externes d'une géante rouge sont peu denses et s'échappent sous forme de forts vents stellaires. En 1994, un système de ce type symbiotique émetteur de rayonnement X de basse énergie a été découvert dans le Petit Nuage de Magellan, galaxie satellite de la Voie lactée. Une douzaine d'autres sources analogues ont été découvertes depuis.

Certaines sources de rayonnement X de faible énergie sont plus difficiles à identifier parce que la vitesse d'accumulation du gaz y varie au cours du temps. Ainsi, grâce à des archives photographiques, on a découvert une source galactique de rayonnement X.

Le rayonnement X et le domaine visible avec un cycle de 40 ans. Quelques astres, tels Nova Muscae 1983 et Nova Cygni 1992, ont alternativement le comportement d'une nova et celui d'un émetteur de rayonnement X de basse énergie, que l'on explique par une période de plusieurs années de « postcombustion ».

Les masses des compagnons nécessaires pour que les systèmes binaires seraient émettent un rayonnement X de faible énergie impliquent que ces systèmes sont relativement jeunes (par rapport à l'âge de notre Galaxie) : le compagnon est rapidement dévoré, et la source arrête d'émettre. Ces systèmes vivent quelques milliards d'années tout au plus et sont

toujours situés dans le plan central de la Galaxie, zone de formation d'étoiles encore active, ou au voisinage de celui-ci. Cette région est riche en systèmes stellaires qui émettent le rayonnement X de faible énergie. Nous ne pouvons donc observer ces sources dans toute la partie de la Galaxie. Une extrapolation à partir de ces observations conduit à une estimation de plusieurs milliers d'objets dans la Galaxie. Sur une période de 1 000 ans, quelques nouvelles sources naissent et quelques autres meurent.

La mort des grosses naines

Que se passe-t-il quand un tel système meurt ? Cette mort survient quand la masse de la naine blanche a augmenté par l'accumulation de gaz. Elle peut atteindre la limite de Chandrasekhar, d'environ 1,4 fois la masse du Soleil. Au-delà de cette limite, les forces quantiques qui maintiennent la naine blanche

possibles, selon la composition initiale et la masse de la naine blanche. Les naines blanches s'enfoncent sur elles-mêmes et deviennent des étoiles à neutrons quand elles ne contiennent pas de carbone ou quand leur masse était supérieure à 1,1 fois la masse du Soleil avant qu'elles ne commencent à dévorer leur compagnon. Les naines blanches

qui ne satisfait pas à ces critères explosent. Elles peuvent amasser lentement de l'hélium, produit par la fusion de l'hydrogène, jusqu'à atteindre la limite de Chandrasekhar et exploser. La couche d'hélium peut aussi atteindre, avant la limite de Chandrasekhar, une masse critique et s'allumer de manière explosive. Dans ce dernier cas, des ondes de choc se propagent à l'intérieur et déclenchent la fusion du carbone dans son cœur. La fusion s'emballe et, en quelques secondes, l'étoile est transformée en nickel et en d'autres éléments de masse comprise entre celle du silicium et celle du fer. Le nickel, dispersé dans l'espace, se désintègre radioactivement en cobalt, puis en fer, en quelques centaines de jours.

Les astronomes avaient déjà attribué les supernovae de type Ia à l'explosion de naines blanches riches en carbone. Le spectre d'émission d'une telle supernova est riche en raies d'hélium et d'hydrogène, contrairement à ceux des autres supernovae produites par l'explosion d'étoiles massives. Les supernovae de type Ia seraient une source importante de fer et d'éléments lourds dans l'Univers. En moyenne, quatre supernovae de type Ia explosent tous les 1 000 ans dans une galaxie telle que la Voie lactée.

Avant l'observation de rayonnement X de basse énergie, les astronomes expliquaient le déroulement des événements qui conduisent à une supernova de type Ia. Les explications invoquaient soit des systèmes doubles symbiotiques, en particulier les novae récurrentes (qui ont été observés au moins deux fois), rares, soit la coalescence de deux naines

blanches riches en carbone. Cependant, cette dernière hypothèse est aujourd'hui contestée : on n'a jamais observé de système de deux naines blanches de masses et de périodes orbitales adéquates, et des calculs ont montré qu'une telle fusion ne serait pas assez violente pour produire une explosion thermonucléaire. Les sources de rayonnement X de faible énergie, où la fusion se produit sur des naines blanches sont les candidats les plus crédibles : leur fréquence de disparition est proche de la fréquence observée des supernovae. Ces sources binaires lumineuses de rayonnement X de faible énergie sont ainsi la première classe d'objets identifiés qui peuvent achever leur existence en supernovae de type Ia.

Ces résultats peuvent améliorer la précision des mesures des distances dans l'Univers. De faibles variations de brillance peuvent faire la différence entre deux hypothèses contradictoires sur l'origine et le destin de l'Univers. Les cosmologistes ont toujours craint que de petites erreurs systématiques, dues à la connaissance incomplète que les astronomes ont de l'évolution des étoiles qui deviennent des supernovae, ne soient prises pour des variations réelles. Quand les sources de rayonnement X mou furent découvertes pour la première fois, per-

ches qu'elles suscitaient rassemblent une cohérence. Nous savons aujourd'hui que plusieurs classes d'étoiles variables, de novae et de supernovae ne sont que des variantes d'un même système : une étoile ordinaire en orbite autour d'une naine blanche à la surface de laquelle de l'hydrogène fusionne.

Peter KAHABKA dirige l'Institut d'astronomie de l'Université d'Amsterdam, où travaille aussi Edward VAN DEN HEUVEL. Saul RAPPAPORT est professeur de physique à l'Institut de technologie du Massachusetts.

Edward VAN DEN HEUVEL et Jan VAN PARADIJS, *Les étoiles binaires émettrices de rayons X*, in *Pour la Science*, janvier 1994.

Sumner S. LAMONTAGNE et Steven GRANT, *Vie et mort de la nova 1991 Cygni*, in *Pour la Science*, mars 1995.

Rosanne DI STEFANO, *Luminous Supersoft X-ray Sources as Progenitors of Type Ia Supernovae*, in *Supersoft X-ray Sources*, sous la direction de Jochen Greiner, Springer-Verlag, 1996.

P. KAHABKA et E.P.J. VAN DEN HEUVEL, *Luminous Supersoft X-ray Sources*, in *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 35, pp. 69-100, 1997.

Pilar RUIZ LAPUENTE, Ramon CANAL et Andrea BURKERT, *SNeIa : On the Binary Progenitors and Expected Statistics*, in *The Thermonuclear Supernovae*, sous la direction de Ramon Canal, Pilar Ruiz-Lapuente et Jordi Isern, Kluwer, 1997.

Kazuyuki NOMOTO, Koichi IWAMOTO et Naohiro KISHIMOTO, *Type Ia Supernovae : Their Origin and Possible Applications in Cosmology*, in *Science*, vol. 276, pp. 1378-1382, 30 mai 1997.

Nicolas PRANTOS et Thierry MONTMERLE, *Naissance, vie et mort des étoiles*, Presses Universitaires de France, 1998.

Le développement des membres

ROBERT RIDDLE • CLIFFORD TABIN

La protéine Sonic hedgehog qui commande le développement des membres chez l'embryon participerait aussi à l'apparition de certains cancers.

L'attente nous avait semblé interminable, mais, enfin, le temps était venu de casser quelques œufs. Une semaine plus tôt, nous avions percé un petit trou dans la coquille d'un œuf fécondé et nous avions introduit quelques cellules génétiquement modifiées dans l'un des deux minuscules bourgeons de l'embryon qui devaient donner les ailes de l'oiseau. Nous avions modifié les cellules pour leur faire produire une protéine que nous pensions être indispensable au développement correct des ailes. Comment les cellules introduites avaient-elles perturbé la formation de l'aile?

Tandis que nous scrutons l'embryon au microscope, nous avons constaté que les cellules génétiquement modifiées avaient déclenché la formation de plusieurs doigts à l'extrémité de l'aile : nous avons bien identifié un facteur essentiel du développement des membres.

Cette expérience, réalisée au cours de l'été 1993, apportait une réponse partielle à la question que des biologistes se posent depuis plus de 100 ans : comment les cellules «reconnaissent»-elles la gauche de la droite, le haut du bas, l'arrière de l'avant? Plus précisément, pourquoi le premier doigt est-il le pouce, et le cinquième l'auriculaire? Qu'est-ce qui garantit que l'os du bras (l'humérus) est le plus proche du tronc, et ceux des doigts les plus éloignés?

1. AU COURS DU DÉVELOPPEMENT embryonnaire, les mains humaines et les ailes de poulet sont façonnées par les mêmes signaux chimiques. Les biologistes identifient aujourd'hui les signaux qui indiquent aux cellules des membres en développement où sont le haut et le bas, l'avant et l'arrière ou la tête et la queue.

Pendant des décennies, les embryologistes ont étudié ces questions en identifiant les cellules nécessaires au développement correct des membres. Grâce aux techniques de la biologie moléculaire, ils peuvent aujourd'hui identifier les gènes de la formation des membres. Plusieurs de ces gènes – et les

protéines qu'ils fabriquent – sont analogues à d'autres gènes qui commandent le développement des membres chez la drosophile : c'est étrange, car les vertébrés et les insectes semblent avoir eu un ancêtre commun dépourvu de membres. Éclairant enfin le miracle de la vie, ces études expliquent également



certaines anomalies du développement embryonnaire. De surcroît, elles montrent que le mécanisme qui détermine l'organisation des membres agit aussi sur d'autres mécanismes du développement, que ce soit la formation du système nerveux central ou la croissance des cellules qui, lorsqu'elle n'est plus contrôlée, déclenche des cancers.

La manipulation des œufs

Au cours de l'embryogenèse, tous les organismes sont-ils régis par des mécanismes similaires ou chacun a-t-il son propre mode de développement? Les bras des humains se développent vraisemblablement de la même façon que les pattes d'un insecte, mais quelle est la ressemblance entre le développement d'un bras de mammifère et celui d'une aile de poulet ou encore d'une aile de drosophile?

Pendant des années, les biologistes ont été convaincus que les facteurs qui modèlent les jambes d'une future ballerine et les pattes d'une drosophile sont très différents. Les ressemblances

paraissaient résulter d'une évolution convergente : des mécanismes différents conduiraient à des structures analogues. Mais deux concepts ont bousculé ces *a priori*.

D'une part, les biologistes ont découvert que des gènes similaires (parfois les mêmes gènes) orchestrent le développement de nombreux organismes, de la mouche à l'homme en passant par la souris. Preuve que tous les animaux ont une tête située à une extrémité et une queue à l'autre, notamment en raison de la présence, chez ces différentes espèces, d'une famille de gènes, les *Hox*. D'autre part, des gènes qui commandent un aspect du développement d'un membre jouent aussi un rôle dans des domaines éloignés, la formation du système nerveux par exemple. La nature semble utiliser sans cesse les mêmes pièces détachées pour construire des organismes très variés.

Les œufs de poule sont très utiles pour l'étude de la formation des membres. Depuis Aristote, qui observa

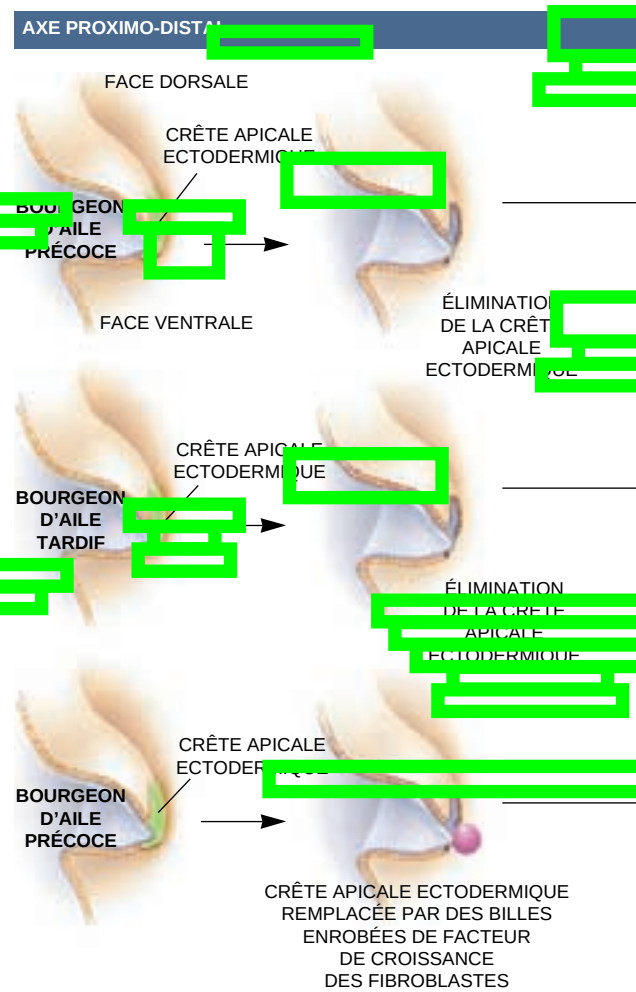
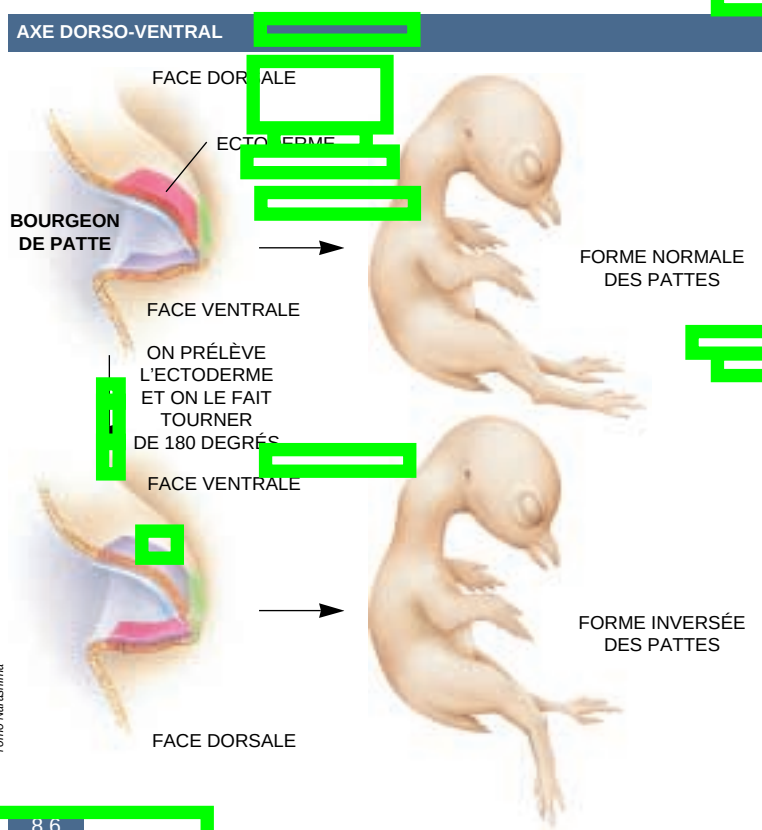
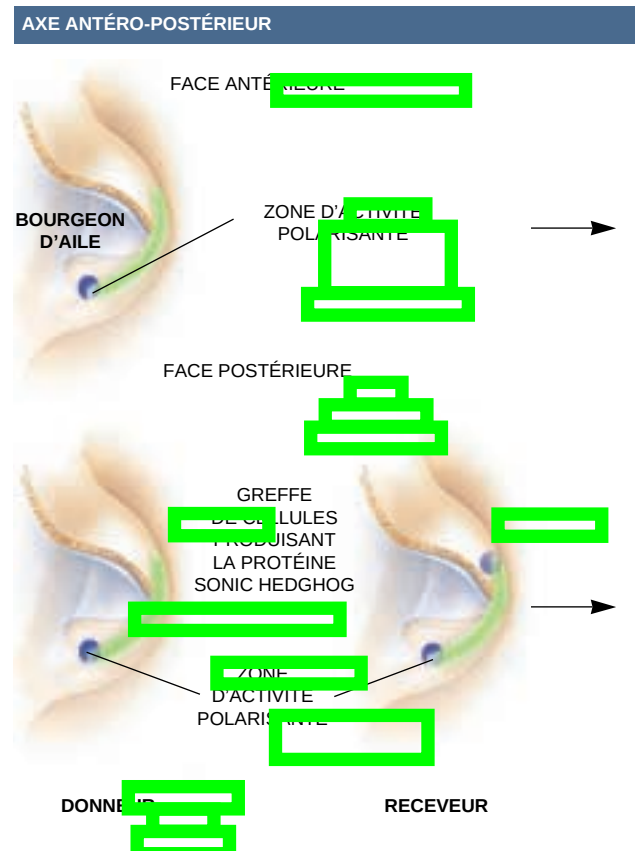
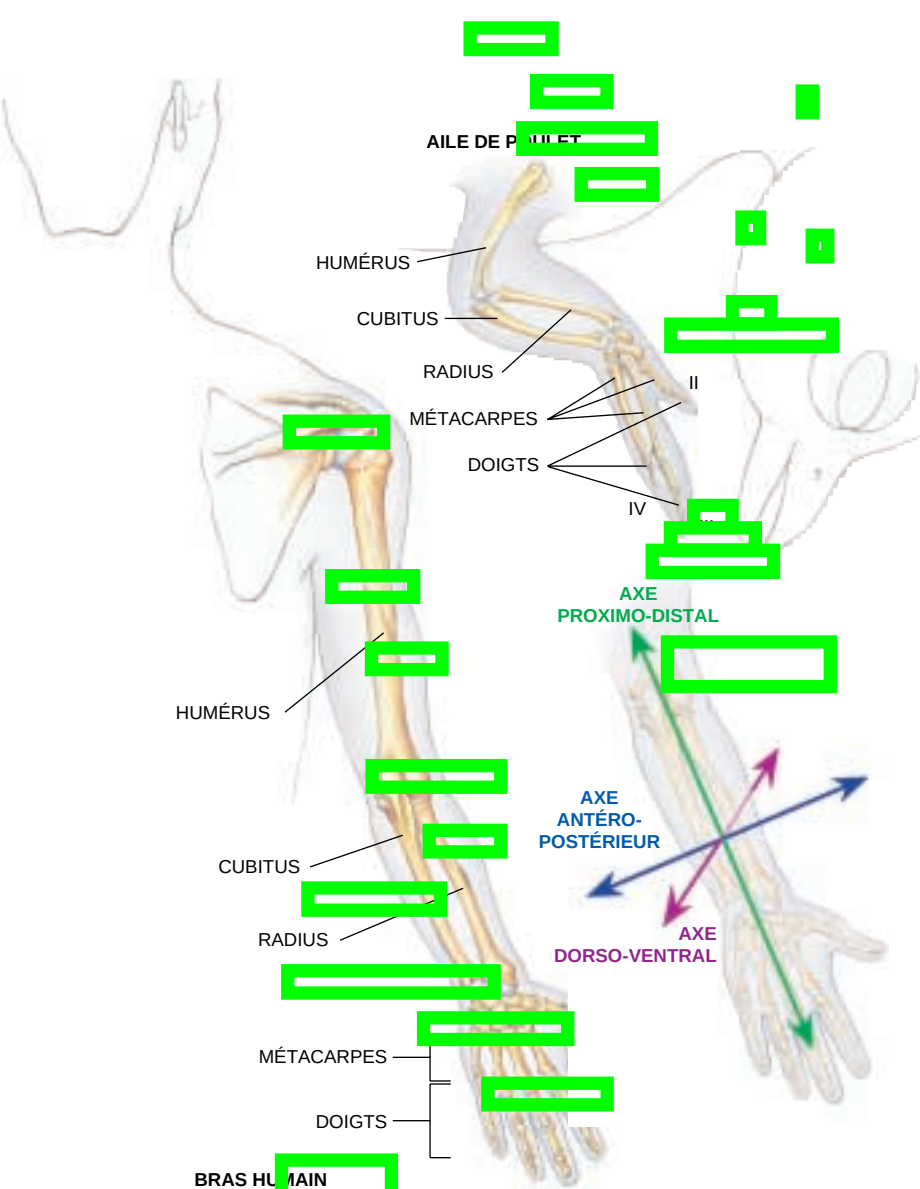
des œufs à des stades d'évolution différents, on sait que, pour observer comment un embryon de poulet se développe, il suffit de pratiquer un petit trou dans la coquille d'un œuf fécondé. Les embryologistes modifient chirurgicalement des embryons de poulets en opérant par ces petites ouvertures, puis en les rebouchant avec de la paraffine (ou avec du ruban adhésif) et en attendant l'éclosion des œufs.

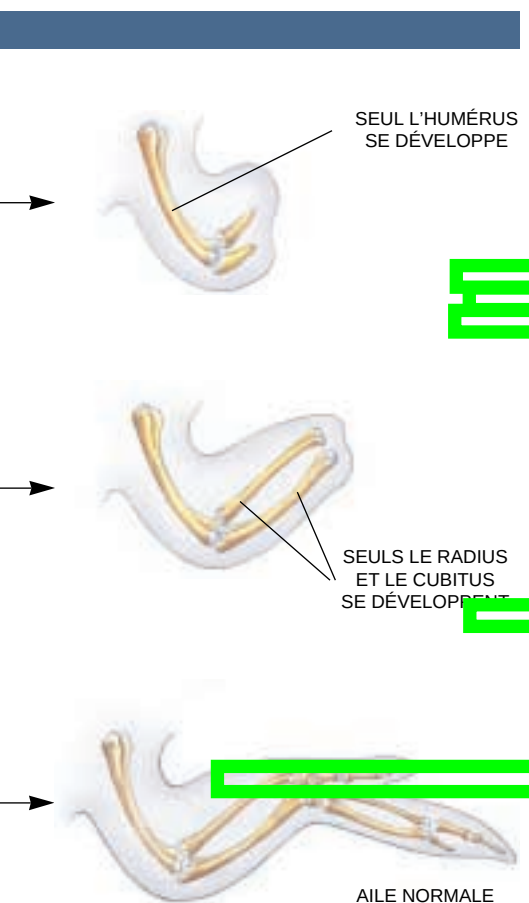
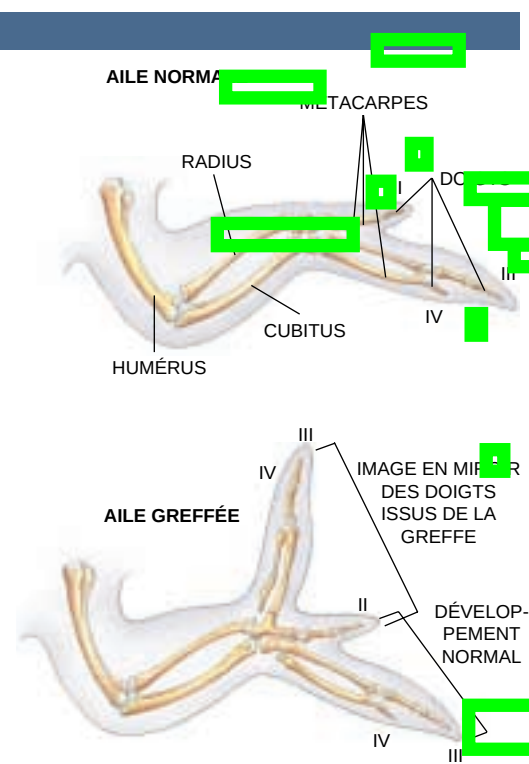
Ainsi, ils ont observé que les membres commencent à se former à partir de bourgeons qui apparaissent sur les côtés de l'embryon. Ces bourgeons consistent en un «manchon» de cellules externes, l'ectoderme, entourant un manchon de cellules du mésoderme. Bien

que les ébauches de membres ne soient pas des structures organisées, elles contiennent toutes les informations requises pour la formation d'un membre : quand on prélève une telle ébauche et qu'on la transplante en un autre endroit de l'embryon, un membre normal se développe dans une position anormale.



Photographies de Lemart Nilsson





Aux tout premiers stades du développement, les cellules d'un bourgeon de membre se différencient pour devenir telle partie du pouce ou de l'auriculaire (c'est-à-dire qu'un groupe de cellules, transplantées, n'engendrent pas spécifiquement tel ou tel doigt, mais elles portent la clé des mécanismes qui aboutiront à l'un ou à l'autre. Les expérimentateurs les utilisent pour élucider les règles qui régissent le développement des membres.

Dans chaque bourgeon, il existe des meneurs et des suiveurs. Ainsi, les embryologistes ont déterminé que chaque axe d'un membre en cours de développement – l'axe antéro-postérieur, l'axe proximal-distal et l'axe dorso-ventral – est commandé par des types cellulaires distincts, présents dans des zones distinctes des bourgeons : ces cellules sont les centres de signalisation.

L'ectoderme, par exemple, est à l'origine d'une partie de la peau de l'adulte, mais il établit aussi l'axe dorso-ventral qui détermine l'emplacement et la formation de tous les muscles et de tous les tendons : quand on enlève l'ectoderme d'un bourgeon de membre et qu'on le replante à 180 degrés avant de le replacer, les muscles qui auraient dû se développer sur la face dorsale de l'aile du poussin se retrouvent sur la face ventrale, et vice versa. Cette transformation résulte d'une signalisation chimique : l'ectoderme envoie des molécules servant de signaux aux cellules sous-jacentes, qui forment les muscles et les tendons.

À la fin des années 1940, John Saunders et ses collègues de l'Université d'Albany observèrent qu'un amas de cellules de l'ectoderme situées à l'extrémité de chaque bourgeon de membre de poulet en cours de développement – qu'ils nommèrent crête apicale ectodermique – contrôlait le développement antéro-postérieur du membre. Lorsqu'ils enlevaient cet amas de cellules, seul un moignon de membre se développait ; lorsqu'ils greffaient un tel amas cellulaire sur un bourgeon normal, deux membres se développaient. Le moment où était pratiquée cette intervention microchirurgicale déterminait le degré d'achèvement du

membre et la distance entre les deux ailes. Ces expériences démontrent que la crête apicale ectodermique est à la fois nécessaire et suffisante à la croissance des membres. De surcroît, comme la croissance des structures proximales des membres précède celle des structures distales, les expériences montraient que la crête apicale ectodermique dirige le développement le long de l'axe proximo-distal.

L'équipe américaine identifia aussi un autre groupe de cellules, qui commande l'axe antéro-postérieur d'un bourgeon. Ces cellules sont juste sous l'ectoderme, le long du bord postérieur du bourgeon. Lorsque les embryologistes transplantaient les cellules de la face postérieure d'un bourgeon de membre, il poussait sur la face antérieure d'un autre bourgeon, ils observaient un ensemble complet de doigts surnuméraires, ou polydactylie (comme si l'équivalent de notre auriculaire était tourné vers l'avant) : les cellules transplantées avaient contraint les cellules antérieures à former des doigts surnuméraires et, aussi, à les retourner (on dit à les repolariser), de sorte que le groupe de doigts surnuméraires nomma la région d'où provenaient ces cellules, la zone d'activité polarisante.

Au milieu des années 1970, à l'Université de Dundee, Cheryll Tickle constata que l'activité de la zone polarisante dépendait du nombre de cellules transplantées : le nombre de doigts surnuméraires augmente avec celui des cellules transplantées. Ch. Tickle en déduisit que la zone d'activité polarisante émettait un signal chimique, nommé morphogène, qui s'atténue à mesure qu'il diffuse dans le bourgeon de membre. La notion de morphogène, proposée dès 1900, s'imposa vers la fin des années 1960. Selon cette hypothèse, les signaux se diffusent à

partir des cellules les plus éloignées de la zone d'activité polarisante, qui reçoivent très peu de morphogène, tandis que les doigts postérieurs se forment à proximité de la zone d'activité polarisante, où les concentrations en morphogène sont supérieures. Toutefois, on ignorait la nature du morphogène et son action exacte.

2. UN BRAS HUMAIN ET UNE AILE DE POULET (en haut à gauche) se développent de la même façon le long des trois axes : dorso-ventral, antéro-postérieur et proximo-distal. En manipulant, chez l'embryon de poulet, des groupes de cellules de bourgeons de membre – tant des cellules qui deviendront des ailes que des cellules qui deviendront des pattes (en bas à gauche, en haut et en bas à droite) –, des biologistes ont déterminé quelles sont les cellules indispensables à la formation correcte des trois axes chez les vertébrés. Ils ont aussi identifié certaines des protéines qui dirigent la formation des membres chez l'embryon.

La protéine «hérisson»

Aujourd'hui, la biologie moléculaire offre aux chercheurs la possibilité d'identifier les gènes du développement et, notamment, ceux qui commandent le développement des membres. Une fois qu'un gène est isolé – c'est-à-dire que son ADN est connu –, il devient un puissant outil de recherche. En identifiant les «lettres chimiques» qui le constituent, on prévoit la structure de la protéine qu'il code. En outre, les généticiens utilisent des frag-

sondes pour déterminer où et quand le gène est activé dans l'embryon. De surcroît, quand un gène est connu, on peut modifier son expression en l'activant en des endroits où, normalement, il ne fonctionne pas ou en l'inactivant là où il devrait fonctionner. On décrypte ainsi la fonction des gènes au cours du développement normal.

Au cours des années 1980 et 1990, des biologistes qui étudiaient les drosophiles découvrirent que les parties postérieures de l'embryon de mouche qui forment le patron de l'embryon produisent une protéine indispensable au développement de la mouche. Cette protéine fut nommée *hedgehog* (ce qui, en anglais, signifie «hérisson»), car les larves de drosophile dont ce gène est muté ne se développent pas normalement : elles sont enroulées et ressemblent à des hérissons en boule.

Nous avons alors voulu savoir si une protéine analogue joue le même rôle dans le développement des vertébrés ; à l'aide de sondes extraites du gène *hedgehog* de la drosophile, nous avons essayé de trouver des gènes similaires dans le génome de la souris, du poulet et du poisson. Nous n'avons pas trouvé une version de ce gène, mais trois ! Nous les avons nommées *Desert hedgehog* (un hérisson commun d'Afrique du Nord), *Indian hedgehog* (une variété du sous-continent indien) et *Sonic hedgehog* (d'après le nom du héros des consoles de jeux Sega).

Ces trois gènes existent chez la souris, chez le poulet et chez le poisson, mais ils ne jouent pas le même rôle au cours du développement de ces organismes. Ainsi, le gène *Desert hedgehog* joue un rôle important dans la production du sperme : les souris mâles dont ce gène est muté sont stériles. Le gène *Indian hedgehog* est exprimé dans le cartilage en cours de croissance. Quant au gène *Sonic hedgehog*, il est

exprimé dans diverses régions de l'organisme, notamment dans les zones d'activité polarisante des bourgeons de membres et dans une région de la moelle épinière qui se comporte comme un centre de signalisation autonome. Enfin, il déclenche la croissance de doigts surnuméraires après introduction dans un bourgeon de membre.

La protéine *hedgehog* de la drosophile étant sécrétée hors des cellules, nous avons pensé que la protéine *Sonic hedgehog* pourrait être l'un des signaux qui gouverne la croissance des membres des vertébrés. Pour le savoir, nous avons introduit le gène *Sonic hedgehog* dans des cellules embryonnaires de poulet cultivées en laboratoire ; puis nous avons implanté ces cellules qui produisent la protéine *Sonic hedgehog* sur la face antérieure d'un bourgeon de membre de poulet. Comme dans les expériences de *Sandwich*, les cellules transplantées ont déclenché la formation d'une deuxième rangée de doigts, orientés vers l'arrière.

De plus, on a montré que la protéine *Sonic hedgehog* purifiée a le même effet que les cellules où l'on a introduit le gène : ce qui prouve que la protéine est bien responsable de la mise en place de l'axe antéro-postérieur au cours du

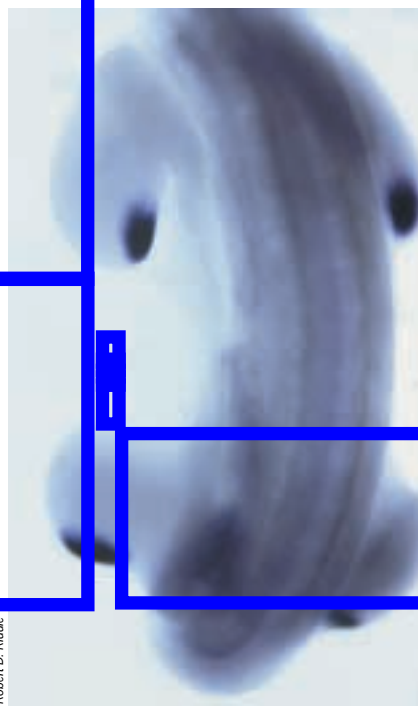
développement des membres des vertébrés. De surcroît, la protéine fonctionne exactement comme nous l'attendions d'un morphogène : des concentrations élevées entraînent la fabrication de tout un jeu de doigts surnuméraires inversés, tandis que des concentrations plus faibles produisent moins de doigts, orientés vers l'arrière.

Le début des années 1990 a été faste pour la biologie du développement. Au moment où nous découvrons que la protéine *Sonic hedgehog* est le signal chimique qui détermine l'axe antéro-postérieur, d'autres biologistes isolaient les facteurs responsables de l'axe proximo-distal, qui sont fabriqués par les cellules de la crête apicale ectodermique. Ces cellules fabriquent plusieurs protéines, nommées facteurs de croissance des fibroblastes, qui assurent la prolifération des cellules sous-jacentes.

Les facteurs de croissance des fibroblastes produisent un membre d'un membre tout comme des cellules de la crête apicale ectodermique : quand on retire la crête apicale ectodermique d'un bourgeon, le membre est atrophié ; en revanche, quand on fixe de minuscules perles enrobées de facteurs de croissance des fibroblastes à l'extrémité d'un tel bourgeon, le membre se développe normalement.

Aujourd'hui, on sait même que, dans un membre en développement, la production de la protéine *Sonic hedgehog* et celle des facteurs de croissance des fibroblastes sont coordonnées, ce qui assure une harmonisation de la croissance selon l'axe antéro-postérieur et selon l'axe proximo-distal. Quand on retire d'un bourgeon de membre de poulet la crête apicale ectodermique, qui produit le facteur de croissance des fibroblastes, la zone d'activité polarisante de ce bourgeon ne fabrique plus la protéine *Sonic hedgehog*. De la même façon, la suppression de la zone d'activité polarisante empêche la crête apicale ectodermique de produire des facteurs de croissance des fibroblastes. En revanche, la protéine *Sonic hedgehog* continue à être fabriquée quand on ajoute des facteurs de croissance. De même, la réintroduction de la protéine *Sonic hedgehog* stimule la production des facteurs de croissance des fibroblastes.

Le gène *Sonic hedgehog* est nécessaire au bon fonctionnement de la zone d'activité polarisante et de la crête apicale ectodermique chez la souris. Des



Robert D. Riddle

3. LES BOURGEONS DE MEMBRE, chez un embryon de poulet, ne se développent en ailes et en pattes, avec la bonne orientation antéro-postérieure, qu'en présence d'une protéine nommée *Sonic hedgehog* (en noir). La protéine est fabriquée sur le bord postérieur de chaque bourgeon.

souris dépourvues de ce gène ont des membres très courts, qui ne se développent correctement ni selon l'axe antéro-postérieur ni selon l'axe proximo-distal.

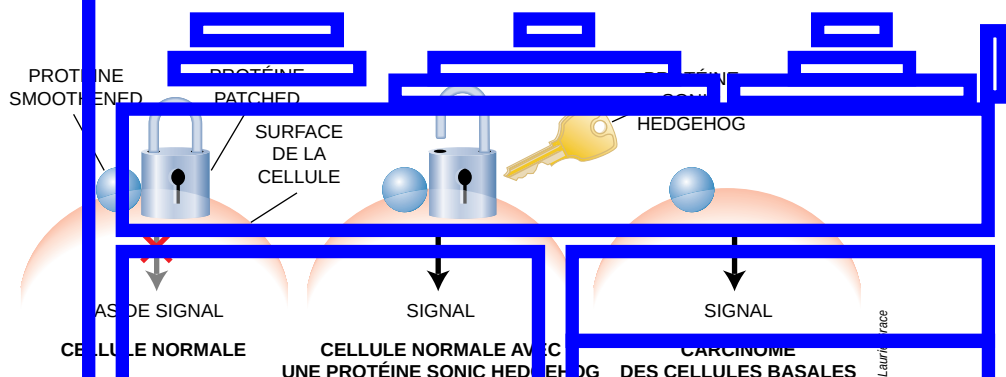
Les souris qui ne produisent pas la protéine Sonic hedgehog présentent d'autres déficits : dans le cerveau et dans la moelle épinière, la protéine indique aux cellules nerveuses primitives de devenir soit des neurones moteurs, soit des neurones sensoriels. Ainsi, les souris dépourvues du gène *Sonic hedgehog*, en plus de leurs pattes trop courtes, n'ont qu'un seul œil et une grave malformation du cerveau, une holoprosencéphalie. Le tube neural n'est pas divisé en deux lobes. Ainsi, le développement normal de neurones moteurs et sensoriels, la formation de deux yeux et celle d'un cerveau bilobé dépendent de l'activité de la protéine Sonic hedgehog dans le tube neural – le précurseur du système nerveux central de l'adulte – et dans les cellules sous-jacentes.

Chez l'homme, l'holoprosencéphalie est la malformation la plus fréquente. Elle survient généralement de façon sporadique, mais, parfois aussi, c'est une maladie héréditaire. Le degré d'holoprosencéphalie varie notablement selon les personnes : certaines ont des déficiences cognitives légères, d'autres un handicap grave, et des déformations du squelette du crâne et de la face.

Des mutations du gène *Sonic hedgehog* sont responsables de certaines formes sporadiques et héréditaires d'holoprosencéphalie. En l'absence d'une protéine Sonic hedgehog fonctionnelle, qui détermine l'axe dorso-ventral du cerveau en développement, les tissus cérébraux et oculaires ne forment pas de structures bilatérales.

Protéines hedgehog et cancer

Qu'un gène, tel *Sonic hedgehog*, intervenant dans la régulation du développement, puisse être impliqué dans des malformations n'a rien d'étonnant. En revanche, les biologistes ont découvert avec surprise des relations entre ce gène et le cancer. La protéine Sonic hedgehog est une protéine de signalisation : elle se lie à une protéine de surface des cellules basales de l'épithélium qui est impliquée dans le déclenchement de carcinomes, des cancers de la peau.



4. LA PROTÉINE SONIC HEDGEHOG active une protéine nommée Patched, qui, à son tour, module l'activité d'une autre protéine, nommée Smoothened ; cette dernière envoie des signaux de croissance à des cellules cutanées. Dans les carcinomes des cellules basales, la protéine Patched est absente ou non fonctionnelle, ce qui permet aux cellules de la peau de se multiplier jusqu'à former des tumeurs.

La plupart des molécules interagissent avec leurs cellules cibles en se fixant à des protéines de surface, nommées récepteurs. La fixation de ces molécules sur leurs récepteurs spécifiques déclenche dans les cellules, une série de réactions qui conduit à l'activation ou à l'inhibition de certains gènes.

Les récepteurs de la protéine Sonic hedgehog sont constitués de deux sous-unités. L'une, Smoothened, transmet le signal vers l'intérieur des cellules, et l'autre, Patched, empêche Smoothened d'agir. Lorsque la protéine Sonic hedgehog se fixe sur Patched, la sous-unité de signalisation Smoothened est activée. Néanmoins, dans des cellules dont le génome muté les empêche de fabriquer des protéines Patched fonctionnelles, la protéine Smoothened est activée en permanence, comme si la protéine Sonic hedgehog inondait sans fin les cellules. Toutefois, on ignore encore comment Sonic hedgehog intervient dans le développement normal de la peau et comment la signalisation interrompue de Smoothened rend les cellules basales tumorales.

Le carcinome des cellules basales est un cancer de l'épiderme ou des cellules qui tapissent les follicules pileux ; il résulte souvent de mutations provoqués par une surexposition aux rayonnements solaires ultraviolets. Un cancer se déclenche quand les deux exemplaires du gène *Patched* sont mutés dans les cellules de follicules pileux. Ce cancer peut apparaître après la naissance, mais certaines personnes naissent avec une mutation dans l'un des deux exemplaires, ce qui augmente les risques de carcinome des cellules basales, puisqu'une seule mutation dans l'autre exemplaire suffit alors à déclencher la maladie. Le carcinome des cellules basales se traite bien, mais les récives sont fréquentes.

Si l'on parvenait à bloquer l'activité de la protéine Smoothened, on réussirait à prévenir ces cancers.

A posteriori, le rôle de la protéine Sonic hedgehog dans les cancers n'est pas surprenant : les biologistes moléculaires ont montré que les mécanismes du développement et ceux du cancer se ressemblent. Les mêmes facteurs de la régulation de la croissance cellulaire et du développement chez l'embryon interviennent aussi chez l'adulte. Lorsque, chez l'embryon, les gènes codant ces facteurs sont mutés, des malformations de naissance surviennent ; lorsque ces mutations apparaissent chez l'adulte, des tumeurs risquent de se développer.

La surprise vient plutôt de la variété des effets de la protéine Sonic hedgehog. Le gène *Sonic hedgehog* est apparu il y a longtemps, et il est probable que les vertébrés utilisent de plusieurs façons les protéines codées par ce gène et par d'autres gènes du développement. Une fois qu'une voie de signalisation moléculaire est tracée, la nature trouve souvent différentes façons de l'utiliser. L'un des thèmes récurrents de la symphonie de la vie pourrait être la participation de la protéine Sonic hedgehog...

Robert RIDDLE est professeur à la Faculté de médecine de Pennsylvanie ; il a travaillé dans le laboratoire que dirige Clifford TABIN à la Faculté de médecine de Harvard.

Scott F. GILBERT, *Developmental Biology*, 5^e édition, Sinauer Associates, 1997.

Neil SHUBIN, Cliff TABIN et Sean CARROLL, *Fossils, Genes and the Evolution of Animal Limbs*, in *Nature*, vol. 388, pp. 639-648, 14 août 1997.

John GERHARD et Marc KIRSCHNER, *Cells, Embryos and Evolution*, Blackwell Science, 1998.

Mesures et information

JACQUES OKSMAN

Comment connaître des grandeurs qui ne sont pas directement observables ? En les déduisant d'observations auxquelles elles sont reliées par des modèles.

Un conducteur qui aborde une agglomération ralentit. Il adapte la vitesse de son véhicule en se fondant sur les indications de son compteur de vitesse. Ce dernier est une interface entre le monde physique, le véhicule en mouvement, et le monde de la décision, le conducteur. Cette interface réalise une mesure.

Dans notre vie quotidienne, la mesure évite que nous nous trompions trop souvent. En science, elle permet de corroborer ou d'infirmer des hypothèses ou des modèles de la réalité. Ainsi, à la fin du XIX^e siècle, la théorie de la relativité restreinte est née quand on a mesuré que la vitesse de la lumière était constante dans des repères en mouvement les uns par rapport aux autres.

La mesure est une recherche de la connaissance quantitative de la réalité, fondée sur l'observation de celle-ci. Toutefois, cette observation n'est pas toujours aussi directe que pour la vitesse d'un véhicule, et la « mesure » n'est pas restreinte à l'« observation » : dans cet article nous nommons « mesure » toute opération visant à l'obtention d'une certaine quantité d'information.

Industriellement, la mesure est évidemment importante. Par exemple, les industriels qui déposent du zinc sur des tôles d'acier pour les protéger de la corrosion souhaitent obtenir une couche le plus uniforme possible, et

part parce qu'une minceur excessive est source de défauts, et, d'autre part, parce qu'une épaisseur excessive est source de gaspillage et de coût. Afin de régler le dépôt, on doit en permanence mesurer l'épaisseur de la couche. Un procédé classique consiste à observer les valeurs de l'impédance d'une bobine électrique placée en regard de la tôle (voir la

figure 1). Alimentée par un courant alternatif, la bobine crée dans le zinc et dans l'acier des courants électriques dits « courants de Foucault », du nom du physicien français Léon Foucault (1819-1868) ; ces courants agissent en retour sur la bobine : pour une fréquence donnée du courant d'alimentation, l'impédance de la bobine (qui caractérise son comportement électrique) dépend de la répartition des courants de Foucault et donc, de l'épaisseur du zinc.

Toutefois, dans les conditions industrielles, ni la température du zinc (dont dépend sa résistivité) ni la distance entre la tôle et la bobine sont connues avec précision. Or, les variations de ces deux dernières grandeurs ont, sur les impédances, des conséquences supérieures à celles qui sont créées par les variations de l'épaisseur du zinc. On doit alors considérer comme inconnues l'épaisseur du zinc, bien sûr, mais aussi sa résistivité et la distance entre la bobine et la tôle.

Comment mesurer l'épaisseur du zinc ? On doit d'abord modéliser le système physique, c'est-à-dire écrire les relations entre les inconnues et les valeurs de l'impédance de la bobine à différentes fréquences : c'est le problème direct. Puis on cherche quelles valeurs des inconnues sont associées aux valeurs de l'impédance qui ont été

En recherche comme dans l'industrie, on doit souvent chercher ainsi des valeurs de grandeurs inconnues à partir de l'observation d'autres grandeurs et de la connaissance de la relation qui existe entre ces inconnues et les observations. Par exemple, en prospection pétrolière, on souhaite souvent connaître la quantité de pétrole présente dans

un gisement, alors que l'on ne peut observer ces grandeurs (des résistances électriques, par exemple) que dans un puits (voir la figure 2). Le contrôle non destructif de canalisations s'effectue souvent par sondage aux ultrasons ou analyse par courants de Foucault : on cherche les caractéristiques géométriques d'éventuelles fissures en analysant des signaux mécaniques ou électriques. Enfin, les instituts de sondage, pour connaître les opinions d'une population, lui posent généralement des questions, puis déduisent de ces observations les pourcentages recherchés. Afin de résoudre de tels problèmes, de nombreuses équipes mettent au point des méthodes générales d'exploration des problèmes inverses. Nous avons notamment trouvé des méthodes qui résolvent les problèmes « mal posés » par un choix pertinent du modèle utilisé.

Des mesures généralisées

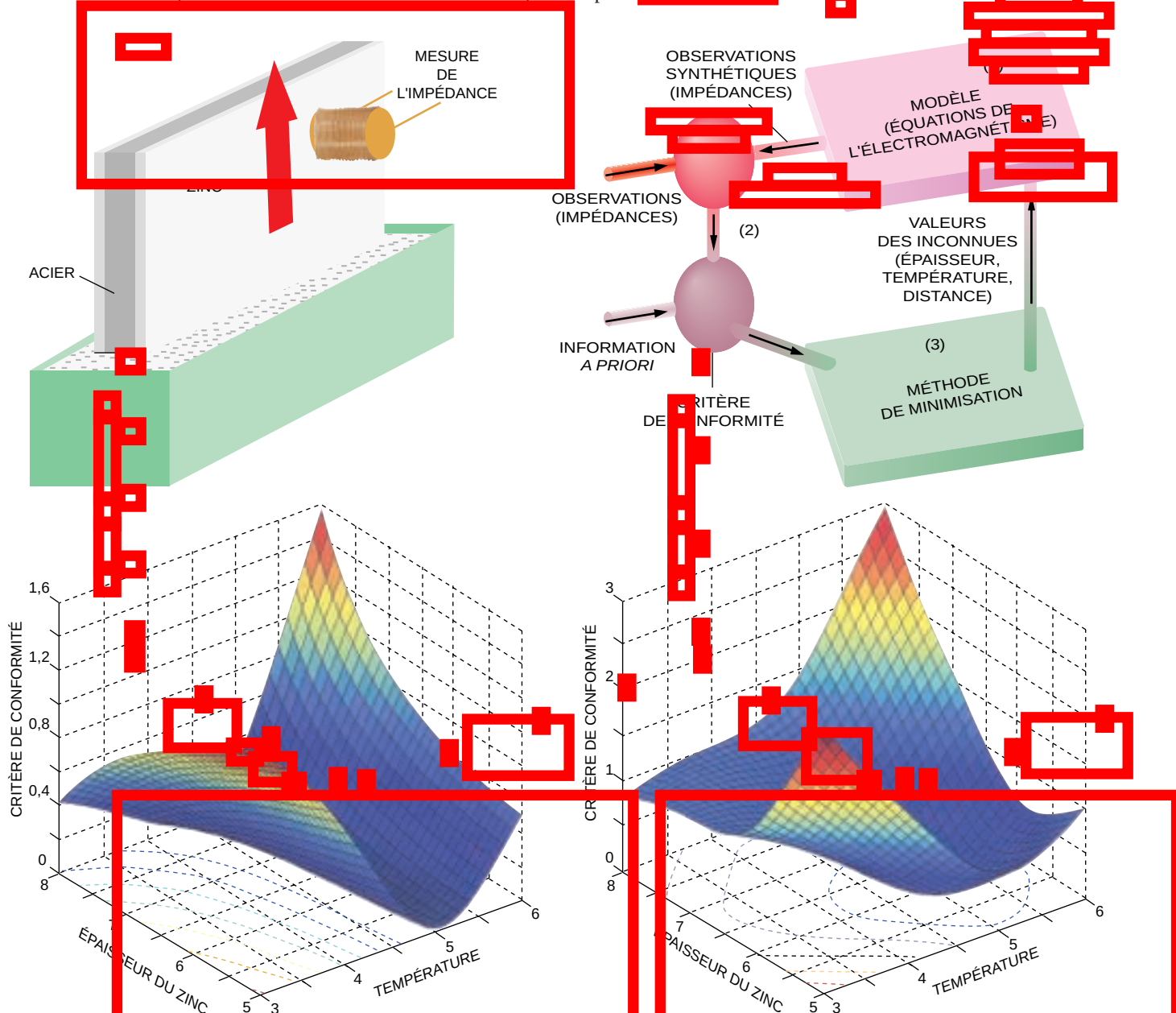
Dans tous les exemples précédents, les mesures sont indirectes, mais elles s'apparentent à la simple mesure d'une longueur à l'aide d'un double décimètre : l'objectif est toujours d'extraire de la réalité une ou plusieurs valeurs de grandeurs. La démarche générale de mesure consiste à chercher les valeurs des inconnues les plus proches de la réalité à partir de

lités, c'est-à-dire d'une relation entre des inconnues et des grandeurs observables (dire, par exemple, que la différence de potentiel aux bornes d'une résistance électrique est proportionnelle au courant qui traverse la résistance exprime un modèle de la réalité). Cette démarche se nomme « inversion », puisqu'il s'agit d'inverser la relation directe.

Ainsi, dans le cas du dépôt de zinc; en nous fondant sur la théorie de l'électromagnétisme, nous obtenons assez facilement des équations qui expriment l'impédance de la bobine à une fréquence donnée en fonction des trois inconnues, l'épaisseur, la température et la distance. On peut ainsi calculer les

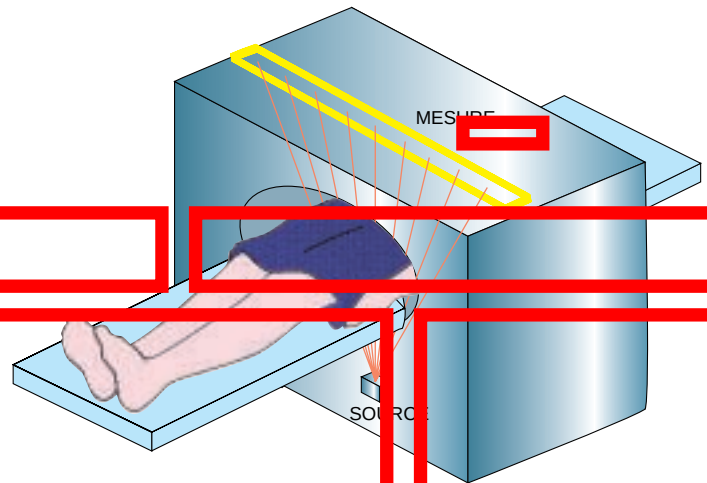
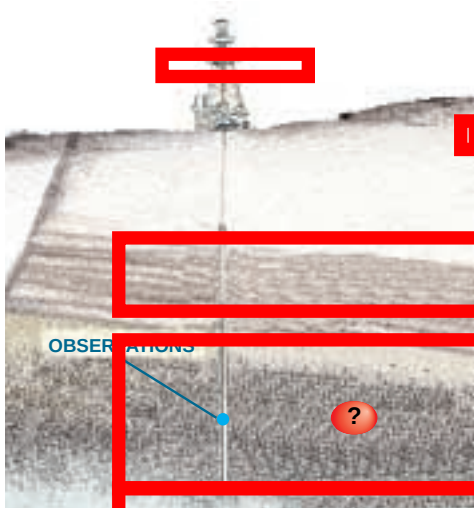
valeurs de l'impédance pour toutes les valeurs possibles des inconnues. Il suffirait alors, en pratique, de chercher pour quelles valeurs des inconnues l'impédance calculée est la plus proche de l'observation. Malheureusement, en pratique, cette méthode donne une infinité de valeurs pour l'épaisseur

Dans de nombreux autres cas, l'inversion est ainsi compliquée, en particulier la multitude des paramètres et de la modélisation. La diversité des exemples que nous traitons nous a conduits à mettre au point une démarche générale de mesure, qui permet de réaliser l'inversion en tenant compte de l'incertitude



1. COMMENT MESURER L'ÉPAISSEUR de zinc déposé sur une tôle d'acier dans une cuve de galvanisation (en haut, à gauche)? Quand on enregistre l'impédance (le comportement électrique) d'une bobine d'induction qui est parcourue par un courant électrique, on obtient un signal qui dépend de l'épaisseur du zinc, mais aussi de la température de la bobine, et de la température, et de la distance. On doit donc chercher les valeurs de ces trois inconnues. On calcule d'abord l'impédance de la bobine pour toutes les valeurs possibles des trois inconnues. Les valeurs de ces inconnues correspondant à une observation donnée sont celles pour lesquelles une «distance» (nommée critère de conformité aux observations) entre l'impédance calculée et l'impédance observée est minimale. Toutefois, à cause de l'incertitude sur les observations, cette méthode fournit une infinité de valeurs (en bas, à gauche, on n'a représenté, par commodité, le critère de conformité qu'en

fonction de deux des trois inconnues ; les unités sont arbitraires) : le critère de conformité est minimal pour une infinité de valeurs de l'épaisseur, qui correspondent à la «vallée» centrale. En choisissant convenablement les fréquences auxquelles on mesure l'impédance de la bobine, on peut toutefois obtenir que le critère de conformité ne présente plus qu'un seul minimum (en bas, à droite). Cet exemple illustre la méthode générale de mesure exposée dans l'article (en haut, à droite) : (1) avec un modèle du système physique étudié, on calcule les observations correspondant à des valeurs arbitraires des inconnues (l'épaisseur, la distance et la température) ; (2) on calcule un critère de conformité entre ces observations synthétiques et les observations réelles, complété de l'information a priori dont on dispose sur les observations ; (3) on recherche les valeurs des inconnues qui minimisent ce critère de conformité, puis on répète l'opération.



2. COMMENT CONNAÎTRE la quantité de pétrole contenu en un point quelconque d'un gisement ? L'opération est de même nature que la tomographie aux rayons X. Dans les deux cas, les nombres d'in-

connues (la quantité de pétrole en divers points autour du puits, ou l'absorption des rayons X par les différentes zones de la section de corps étudiée) est supérieur au nombre de mesures.

certitude. Nous le verrons, cette démarche seconde sur la recherche d'une modélisation du problème qui tient compte à la fois des incertitudes et des *a priori* sur les valeurs cherchées.

Le cadre général que nous proposons ne remplace pas le savoir-faire des ingénieurs, mais il les guide pour l'élaboration de méthodes de mesure adaptées à chaque situation. Il leur permet aussi d'évaluer quantitativement la qualité de ces méthodes.

Problèmes non linéaires

La première des difficultés que pose le problème de la mesure tient aux relations entre les inconnues et les observations. Lorsque nous mesurons la vitesse du moteur dans une voiture, nous « remontons » de l'observation de la position angulaire de l'aiguille du compte-tours jusqu'à cette vitesse. On n'a évidemment guère besoin, dans ce cas, de techniques sophistiquées et spécialisées. Toutefois, le concepteur du compte-tours a étudié la relation qui existe entre la vitesse (inconnue) et la position angulaire de l'aiguille (observation), puis il a inversé cette relation pour obtenir celle qui existe entre l'observation et la vitesse mesurée : c'est cette dernière relation qu'il a exprimée en traçant la courbe de la figure 1.

Dans ce cas simple, la relation directe est linéaire : il suffit de multiplier la vitesse par un coefficient constant pour connaître la déviation correspondante de l'aiguille. Pour la mesure de l'épaisseur du zinc, si la relation directe était linéaire, c'est-à-dire si l'impédance à une fréquence donnée était égale à la somme de a fois l'épaisseur, plus b fois

la température, plus c fois la distance, on pourrait écrire trois fois cette relation pour trois fréquences différentes, et on représenterait le problème par une matrice carrée, tableau de coefficients a , b et c pour chacune des trois fréquences. Afin de résoudre le problème inverse, on calculerait la matrice inverse, et l'on déterminerait les inconnues en multipliant cette matrice inverse par l'ensemble des observations.

Toutefois, en règle générale, on ne dispose pas du même nombre d'observations que d'inconnues. Par exemple, en tomographie aux rayons X, une source ponctuelle émet des rayons X, et l'on souhaite reconstruire l'image d'une coupe (à deux dimensions) d'un objet avec des capteurs disposés en ligne (donc sur une seule dimension). Les inconnues sont les coefficients d'absorption des rayonnements émis. Ces coefficients sont à l'évidence plus nombreux que les observations, l'intensité reçue par les capteurs. *A contrario*, dans le cas des sondages par exemple, on réalise un grand nombre d'observations, alors que l'on ne recherche qu'une inconnue.

Dans tous ces cas, l'inversion n'est possible que si le nombre d'observations est égal au nombre d'inconnues. Si la relation directe était linéaire, on la représenterait par une matrice rectangulaire, et on résoudrait le problème inverse en calculant une matrice « inverse », par une méthode mathématique qui généralise la notion d'inverse. Toutefois, les relations directes de la nature physique ne sont

en général pas linéaires, sauf localement (parmi les problèmes physiques, les cas linéaires sont ceux du compteur de Geiger et de la tomographie). On ne peut même que rarement exprimer la relation directe sous la forme d'une fonction mathématique explicite qui relie les inconnues aux observations. On est alors contraint de calculer numériquement les valeurs des observations en fonction des inconnues.

Construire un modèle

Dans l'exemple du dépôt de zinc, nous avons utilisé un modèle pour relier les inconnues aux observations. Plus généralement, il existe deux approches pour obtenir un modèle d'un système physique. La première utilise la connaissance des lois internes du système. Dans l'exemple du zinc, on applique les équations fondamentales de l'électromagnétisme et la géométrie de la tôle et de la bobine pour calculer l'impédance de cette dernière. C'est ce que l'on nomme un modèle de connaissance, ou modèle interne. Ces modèles sont utilisés en physique pour la prévision des résultats d'expériences : leur vocation est de représenter le système étudié.

La seconde approche consiste à recenser d'abord les inconnues et les observations. Si, pour les relier, des mathématiques appropriés, on choisit la fonction mathématique qui représente au mieux la relation entre les inconnues et les observations. On parle alors de modèles externes, ou de comportement.

Ces deux approches ne sont pas contradictoires ; elles peuvent même être complémentaires. Leurs caractéristiques

sont, en revanche, différentes. Les modèles internes nécessitent non seulement une connaissance fine des phénomènes, qui sera toujours limitée par des approximations, mais aussi la possibilité de réduire de cette connaissance les relations entre les inconnues et les observations. Pour résoudre le problème direct, on doit intégrer ces lois locales. Sauf dans quelques cas très simples, donc peu réalistes, cette intégration n'est possible que par un calcul numérique. Ces calculs sont longs et complexes, et l'on ne peut donc songer à les utiliser systématiquement dans les mesures, sauf si l'on n'est pas tributaire du temps de calcul.

Les modèles externes ont des avantages et des inconvénients symétriques des modèles internes. Tout d'abord, ils n'ont pas la caractéristique universel des premiers : ils peuvent être satisfaisants pour un système donné, mais très mauvais pour un autre, à peine différent du premier. De plus, ils ne sont représentatifs que du domaine où l'on a observé le phénomène à modéliser. Par exemple, un amplificateur peut être modélisé par une constante multiplicative si sa tension d'entrée est inférieure à dix volts, mais des saturations, non prises en compte dans ce modèle, peuvent apparaître au-delà. En revanche, ces modèles ont une très faible complexité calculatoire, ce qui est évidemment avantageux.

Comment alors choisir un modèle ? Un modèle interne est unique, à un degré de finesse donné, tandis qu'il peut exister plusieurs modèles externes, différant par leur structure, c'est-à-dire par la fonction analytique qui relie les entrées aux sorties. Par exemple, par trois points, on peut choisir de faire passer soit une parabole, soit une cubique (une courbe associée à un polynôme de degré égal à 3), soit encore une fraction rationnelle (le quotient de deux polynômes). Puisque de tels choix existent, on doit tenir compte des objectifs de la mesure.

Imaginons ainsi que nous voulions prédire la population d'un État à partir d'observations passées de celle-ci, il suffit de choisir un modèle de cette évolution et d'extrapoler. Les programmes d'ajustement de courbes proposent souvent, par exemple, d'utiliser des fonctions nommées « polynômes de Lagrange », dont les coefficients sont tels que la courbe représentative passe par tous les points observés (voir la figure 3). Malheureusement, cette courbe chute

rapidement après le dernier point observé : elle ne donne évidemment pas une prévision correcte de la démographie (sauf guerre ou épidémie improbables). En revanche, les polynômes de Lagrange sont utiles pour les estimations, par interpolation, de la population entre deux années d'observation.

Au reste, dit, on doit choisir les modèles en fonction de ce que l'on veut mesurer. Un modèle ne sert pas à représenter toute la réalité : il n'est utile que par référence à un objectif donné.

Existe-t-il des critères objectifs de choix de modèles ? Le but d'une mesure est d'obtenir un maximum d'information à partir d'observations. Dans l'exemple de la prédiction de la population, la meilleure fonction n'est pas celle qui passe par tous les points observés, mais celle qui assure la prédiction la plus précise possible. De façon générale, le choix du modèle influe sur l'incertitude finale sur les valeurs des inconnues : il est donc logique de choisir le modèle tel que l'incertitude finale soit la plus faible possible. Dans la pratique, on fonde ce choix sur la mesure de l'incertitude sur les observations et l'incertitude finale sur les inconnues.

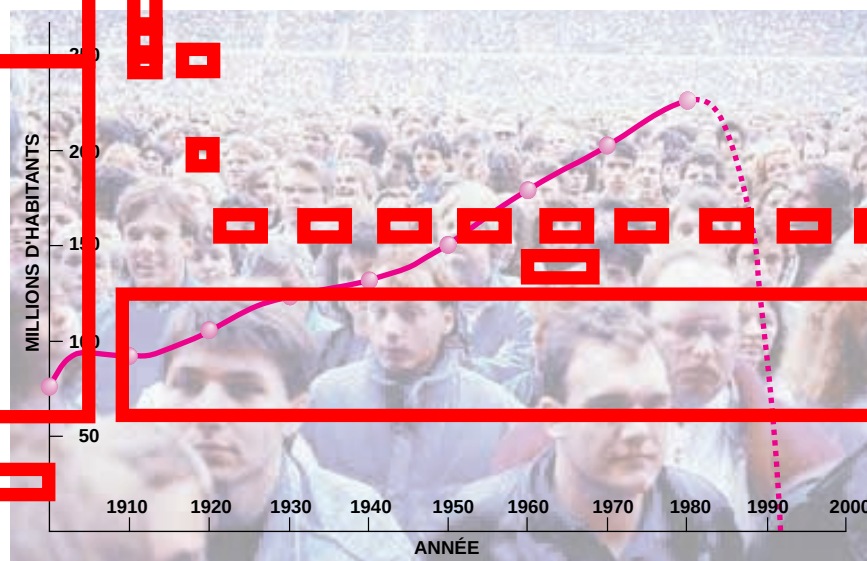
Quantifier l'incertain

On ne parvient toutefois jamais à annuler complètement cette incertitude. S'il est une chose que sait l'homme, ou qu'il devrait savoir, c'est qu'il ne sait pas

tout : sa connaissance de la réalité est imparfaite. La relation directe, aussi simple soit-elle, n'est jamais connue avec une certitude absolue. Dans le cas, pourtant, où la mesure est une vitesse on ne tient ainsi pas compte du jeu des pièces, ni des vibrations mécaniques du mouvement brownien dans l'air. En pratique, on ne distingue pas l'incertitude des observations des incertitudes liées au choix du modèle : on traite toutes les incertitudes comme s'il s'agissait d'incertitudes sur les observations.

Or, quand on mesure une grandeur, on a autant besoin de connaître sa valeur que la précision avec laquelle elle est obtenue. Nous devons donc, lors de l'inversion, prendre en compte les incertitudes dans nos calculs. Nous utilisons à cette fin une approche probabiliste : toute grandeur incertaine, nous associons une fonction, nommée fonction de densité de probabilité, dont l'amplitude est proportionnelle à la probabilité de trouver une valeur de la grandeur au voisinage d'un point. Nous pouvons alors appliquer à ces

mathématiques des probabilités et des statistiques, et nous prenons effectivement en compte l'incertitude dans leur traitement. Cette approche permet aussi de donner une définition quantitative de l'information, par une formule qui exprime la quantité d'information en fonction de la densité de probabilité.



3. LES VARIATIONS DE LA POPULATION des États-Unis sont bien modélisées par une fonction analytique qui passe par tous les points connus (en rose, cet exemple est une mise en garde donnée par le logiciel MATLAB). Ce modèle ne permet manifestement pas de faire des prévisions : il prévoit une diminution très improbable. En revanche, le même modèle est utile pour des interpolations entre des mesures.

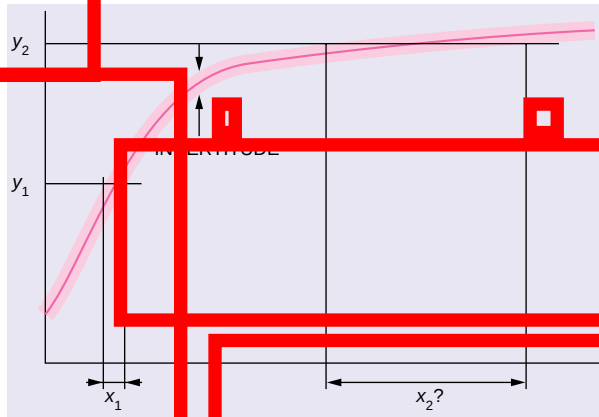
Notons que l'utilisation de lois de probabilité ne signifie pas qu'il s'agit de données pulvées soit aléatoires. Nous nous plaçons ici dans le cadre purement utilitaire de la définition de l'information : nous ne nous préoccupons pas du sens de la fonction de densité de probabilité, mais seulement de son utilité pour le traitement de l'incertitude.

Grâce aux lois de probabilité, on peut aussi définir la justesse de la mesure : si l'on fait une mesure, on veut non seulement qu'elle soit le moins incertaine possible, mais aussi qu'elle soit juste ! Ainsi, au tir à la cible, des impacts groupés sur le bord de la cible témoignent d'un tir peu incertain, mais faux (c'est généralement ce qu'on a envisagé !) : la justesse est la différence entre la valeur vraie de la grandeur cherchée (qui doit être obtenue par l'étalonnage du système de mesure, c'est-à-dire le relevé des observations en fonction de valeurs fixées pour les grandeurs qui seront inconnues quand on effectuera les mesures) et la moyenne de la loi de probabilité de la mesure.

Dans les cas où une faible incertitude sur les observations conduit à une très grande incertitude sur les inconnues, par exemple quand la relation entre une grandeur observée et la grandeur cherchée est une fonction à très faible pente (voir la figure 4), on ne peut pas simplement inverser le problème direct. Ces cas, qualifiés de « problèmes mal posés », sont fréquents. Ainsi, dans l'exemple du dépôt de zinc, un choix sans précaution des fréquences de travail conduit à une infinité de valeurs possibles de l'épaisseur.

Si le problème direct est non linéaire, on ne sait généralement pas calculer la transformation des lois de probabilité des incertitudes entre les inconnues et les observations. De plus, le caractère non linéaire transforme des lois dites « centrées » (dont la moyenne est nulle) en des lois « décentrées » (dont l'effort, nous

dis qu'un système linéaire soumis à une entrée de valeur moyenne nulle présente en sortie une valeur moyenne nulle (la somme des combinaisons linéaires des incertitudes reste nulle), un système dont la sortie est proportionnelle au carré de l'entrée, par exemple, présente en sortie, dans les mêmes conditions, une valeur moyenne



4. DANS UN PROBLÈME MAL POSÉ, l'incertitude sur les inconnues x est beaucoup plus grande que l'incertitude sur les observations y (cette incertitude est représentée par l'épaisseur de la courbe, en rose clair). On ne peut pas alors inverser le problème, c'est-à-dire déterminer la valeur de x_2 correspondant à l'observation y_2 (en revanche, x_1 est assez bien défini à partir de y_1).

non nulle, ce sont les carrés des incertitudes qui sont alors combinés, et la justesse introduit une erreur de justesse (un biais), *a priori* non connus, puisque l'on ne dispose pas d'un étalonnage (comme peut pas l'être la fonction montrant les observations en fonction des inconnues ; dans l'exemple du puits de pétrole, on ne peut pas fabriquer de gisement dont le contenu et la forme soient connus !).

Connaître ce que l'on cherche

Pour résoudre ces problèmes mal posés, comment choisir la « bonne solution » (ou du moins la « meilleure ») parmi l'infinité des solutions possibles ? Si quelqu'un vous demandait la température de notre corps à plus ou moins deux degrés près, nous répondrions sans trop d'hésitation : 37 °C. Supposons que, prenant notre température, nous devions choisir parmi trois valeurs données par un thermomètre (35,5 °C, 11 °C et 37,7 °C. Quelle valeur nous paraîtrait la meilleure ? La réponse, évidente, nous montre que nous avons un critère de choix : avant de faire la mesure, nous avons une idée

de la température de notre corps, une information sur les inconnues avant que la mesure ne soit effectuée : c'est l'information *a priori*.

Comment utiliser cette information *a priori* ? Tout d'abord, on doit la représenter mathématiquement. Toujours dans l'exemple de la température corporelle, quel serait notre « degré de surprise » en fonction de la valeur donnée

par le thermomètre ? Nous serions très surpris de trouver 60 °C ou 15 °C, moins étonné de trouver 37 °C ou 38 °C. Pour utiliser cette information, le même formalisme que pour l'incertitude est utile : nous définissons une fonction « inverse de la surprise », et nous considérons qu'elle représente la densité de probabilité de la

variable aléatoire. Cette modélisation de l'incertitude est dite « bayésienne », du nom du mathématicien anglais Thomas Bayes (1702-1761) ; en pratique, c'est l'un des procédés les plus efficaces pour traiter les problèmes de mesures généralisées que nous exposons ici.

On améliore encore les résultats en prenant également en compte l'information *a priori* sur les solutions recherchées, et non plus seulement sur leurs valeurs. Si l'on sait par exemple qu'un signal radio est émis en modulation de fréquence, le récepteur le recherche sous la forme du cosinus d'une fonction du temps : on ne cherche des solutions que dans l'ensemble restreint de celles qui ont des propriétés particulières.

Cette technique est utilisée par les systèmes dits « numériques » (électroniques ou informatiques), qui ne peuvent suivre continuellement les variations des signaux et que l'on rencontre presque partout, particulièrement dans le domaine des télécommunications : un signal est représenté par la suite de ses valeurs obtenues à des instants équirépartis dans le temps. Le problème de la reconstitution des signaux à partir des échantillons observés est bien plus que mal posé.

C'est le « problème d'échantillonnage », qui est la base du traitement numérique du signal, impose la structure de la solution : on cherche la courbe qui fluctue le moins entre les points mesurés (en d'autres termes, l'information *a priori* est d'ordre type, le signal émis a été échantillonné suffisamment rapidement par le dispositif émetteur).

Une démarche de mesure

À ce stade, nous pouvons exprimer une démarche générale permettant d'effectuer une mesure, ou encore, comme

nous l'avons dit, d'obtenir de «bonnes solutions». Dans l'exemple du compteur de vitesse, la méthode suivie par le graveur de cadran a été la suivante : il a commencé par tracer la courbe donnant la position de l'aiguille pour certaines valeurs de la vitesse et a ainsi obtenu un modèle direct. Puis il s'est posé la question : «Pour chaque position de l'aiguille, quelle est la valeur de la vitesse qui, appliquée au modèle, créerait un déplacement identique du mouvement réel?» Il a ensuite porté ces indications de vitesse pour chacune des positions.

Ainsi, «l'ensemble des «bonnes valeurs» des inconnues à l'entrée du modèle direct, le calcul doit fournir des observations «synthétiques» les plus proches possibles des observations réelles : c'est le critère de conformité aux observations. Pour les cas simples, tel le compteur de vitesse, observations réelles et observations synthétiques peuvent être égales.

Dans les systèmes très incertains ou quand le nombre des observations est différent de celui des grandeurs recherchées, la conformité absolue aux observations est impossible. Dans de tels problèmes mal posés, la conformité aux observations ne permet pas d'obtenir une solution unique (du moins, avec une précision suffisante). On ajoute alors un second critère : les observations synthétiques doivent être aussi proches que possible de ce que l'on en savait avant de faire la mesure. C'est un critère de conformité à l'information *a priori*.

Dans le cas général, on définit un critère composite, formé d'un critère de conformité aux observations (distance entre les observations et les sorties du modèle) et d'un critère de conformité à l'information *a priori*. Les «bonnes valeurs» des inconnues sont celles qui minimisent ce critère composite. Dans la pratique, on utilise un algorithme numérique qui effectue des itérations en proposant des solutions successives jusqu'à ce que le critère composite soit minimisé.

La mesure de l'information donnée

Lorsqu'un ingénieur adopte la démarche que nous venons d'exposer afin de résoudre un problème de mesure particulier, il est conduit à effectuer des choix à plusieurs niveaux de la chaîne de mesure. Ainsi, nous avons vu que la

qualité des mesures dépend du modèle choisi. Plus généralement, on peut énoncer un critère informationnel de la qualité d'une méthode de mesure, qui guidera l'ensemble des choix.

Supposons que l'on fasse la mesure d'une tension comprise entre 0 et 256 volts avec un convertisseur analogique-numérique parfait à 256 niveaux de quantification : un tel appareil transforme une tension analogique, c'est-à-dire variant continûment, en une tension choisie parmi 256 valeurs numériques (ici, chaque niveau de quantification a donc une largeur de 1 volt). Avant de faire la mesure, on sait que la tension sera toujours comprise entre 0 et 256 volts : c'est l'information *a priori*. Après la mesure, si l'appareil affiche par exemple 123 volts, on sait que la tension était comprise entre 122 et 124 volts. L'information *a posteriori*. La mesure a divisé l'incertitude par 256, et l'on peut alors calculer l'«incrément d'information», qui traduit la différence entre l'information *a posteriori* et l'information *a priori*, exprimées par des fonctions de densité de probabilité. Ce critère est mesuré en bits : il est ici égal à 8 bits ($2^8 = 256$).

La notion d'incrément d'information caractérise ainsi de façon quantitative la qualité d'une mesure, ou d'un système de mesure (ensemble de l'appareillage et des algorithmes utilisés). Plus cet incrément est grand, meilleure est la mesure.

L'incrément d'information dépend évidemment de l'instrument de mesure. Celui-ci est en partie caractérisé par un certain nombre de paramètres : le nombre et les valeurs des fréquences dans le cas du zinc, le nombre et la position des capteurs de rayonnement dans le cas de la tomographie en rayons X, ou encore le nombre de personnes interrogées dans un sondage. On peut aussi définir ces paramètres, appelés instrumentaux, soit en maximisant l'incrément d'information pour un nombre d'observations donné, soit en minimisant le

coût de l'information donnée, ce dernier cas se traduisant évidemment par une diminution de la complexité, donc du coût, du système de mesure.

Toutefois, à l'exception, heureusement courante, de quelques cas simples (systèmes linéaires et incertitudes réparties selon une fonction de Gauss, suivant une courbe «en

cloche»), l'incrément d'information ne peut être déterminé que par des méthodes approximatives et lourdes, tandis que les biais induits par certaines non linéarités ne peuvent être pris en compte par des méthodes analytiques. Toutes ces raisons créent des difficultés pratiques qui font que la notion d'incrément d'information, la seule conforme à une définition «informationnelle» de la mesure, reste rarement utilisée (sauf dans le cas du sondage, et, plus généralement, des statistiques, où sa mise en œuvre est évidente). Notre équipe a mis au point des méthodes d'évaluation statistiques pour remédier à cette difficulté. Dans les cas très complexes, plusieurs autres méthodes existent, telles celles qui cherchent à minimiser le caractère mal posé du problème.

C'est de ce que nous avons fait pour la mesure de l'épaisseur du zinc, en optimisant le choix des fréquences de travail (c'est l'optimisation de l'instrument). Cette optimisation a permis de choisir des fréquences pour lesquelles les mesures de l'impédance de bobine antérieure la détermination (par la minimisation d'un critère de conformité aux observations et à l'information *a priori*) d'un triplet d'inconnues unique (à des incertitudes raisonnables) près, c'est-à-dire du même ordre de grandeur que celles présentes sur les mesures d'impédance).

Jacques OKSMAN dirige le Service des mesures à l'École supérieure d'électricité à Gif-sur-Yvette.

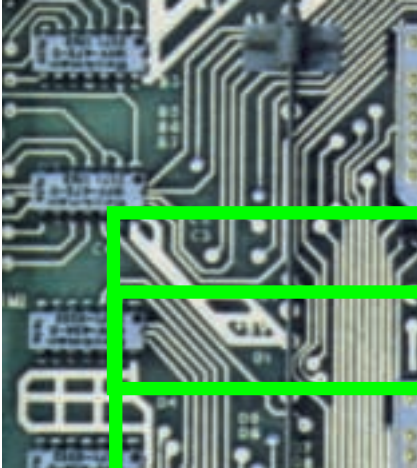
A. TARTAGLIA, *Inverse Problem Theory- Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation*, Elsevier, 1987.

E. WALTER et L. PRONZATO, *Outils et méthodes pour la reconstruction de modèles paramétriques à partir de données expérimentales*, Masson, 1994.

E. FLEURY et J. OKSMAN, *Débit-métrie par traceurs : reconstruction du profil de concentration*, 1^{er} Colloque interdisciplinaire en instrumentation, pp. 531-533, 18-19 novembre 1998.

J. OKSMAN, J. OKSMAN et G. FLEURY, *Information Criteria for the Choice of Parametric Functions for Measurement*, in *IEEE Transactions on Measurement*, à paraître.

M. DAVOUST, G. FLEURY et J. OKSMAN, *A Parametric Estimation Approach for Grooves Dimensioning using Remote Field Eddy Current Inspection*, in *Research in Nondestructing Evaluation*, à paraître.



Graphes et électronique

JOHN STEWART

Comment tester les circuits imprimés.

Le coloriage, un jeu d'enfant ? Détrompez-vous : de nombreux mathématiciens ont cherché à démontrer que quatre couleurs seulement permettent de colorier toutes les cartes de sorte que les pays voisins soient de couleurs différentes, et c'est seulement un superordinateur qui a fini le travail : il a examiné un à un les nombreux cas qui restaient après l'analyse stricte-ment mathématique du problème. Le plus fascinant de l'histoire, c'est que des résultats mathématiques voisins, à propos de coloriages, ont des applications inattendues... en électronique.

Les objets mathématiques utiles sont cette fois des graphes, composés de sommets reliés par des lignes nommées arcs ou arêtes. L'«épaisseur» d'un graphe, notamment, est un concept découvert par

des chercheurs des Laboratoires AT&T Bell, à Murray Hill, qui a été utilisé en électronique par Joan Hutchinson, du Collège Malacoste, dans le Minnesota.

Commençons par une définition : un graphe est planaire, ou d'épaisseur égale à un, si peut être dessiné sur un plan, sans que ses arcs se recoupent. Les graphes d'épaisseur égale à deux sont ceux dont les arcs doivent être groupés en deux ensembles planaires. De même, les graphes d'épaisseur égale à trois ont des arcs qui sont groupés en trois ensembles planaires, etc.

Ainsi un graphe d'épaisseur égale à deux est comme un sandwich : une des tranches de pain porte les arcs du premier ensemble, qui ne se coupent jamais ; l'autre tranche porte les arcs du second ensemble qui ne se coupent pas non plus. Les sommets étirés en segments verticaux forment en quelque sorte la garniture du sandwich (voir la figure 1).

De même, un circuit imprimé est analogue à un graphe dont les sommets sont les composants électroniques, et dont les arcs sont les connexions électriques entre les composants. Idéalement, les fabricants cherchent à réaliser des circuits imprimés planaires, sans fils chevauchant les pistes conductrices. Avec les cartes à double face, ils réalisent des graphes d'épaisseur égale à deux. Pour réaliser des circuits associés à des graphes d'épaisseur supérieure, plus d'un circuit imprimé s'impose. Ce même genre de considérations se retrouve en micro-électronique, dans la fabrication des puces.

De nombreux circuits imprimés utilisés dans l'industrie sont des grilles de 100×100 trous, où l'on fixe des composants, en les reliant par des pistes horizontales ou verticales faites d'un matériau conducteur. Les fabricants sont confrontés au difficile problème de la détection des cartes défectueuses, où des parties de pistes relient des composants qui devraient être séparés.

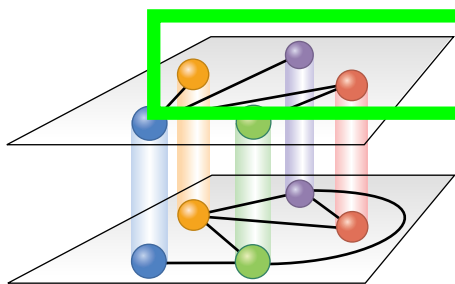
Pour des raisons pratiques, les fabricants groupent les composants d'un circuit imprimé en «maillages de pistes» : un

maillage est un ensemble de composants reliés par les pistes conductrices, sans boucle. Nous examinerons ici le problème de la recherche de courts-circuits, c'est-à-dire de connexions fautives. La méthode de test la plus simple est l'examen de toutes les paires de maillages : on connecte un maillage d'une paire testée au pôle positif d'une pile, et l'autre maillage au pôle négatif, via une ampoule. Si les maillages sont connectés, le courant électrique passe dans la lampe, qui s'allume (dans l'industrie électronique, les appareils de test sont automatisés).

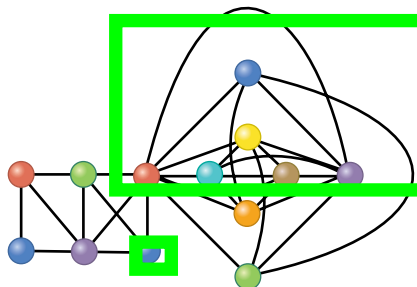
Toutefois, pour des circuits à n maillages, cette méthode nécessite $n(n-1)/2$ tests (c'est le nombre de paires de maillages). Avec des circuits imprimés qui comportent quelque 500 maillages, il faut 122 500 tests par carte, ce qui est excessif. La simple application du concept d'épaisseur d'un graphe réduit le nombre de tests à 41 ! Et, même, avec un peu de réflexion, à seulement 4.

Commençons par construire un graphe qui puisse décrire les courts-circuits : le «graphe de maillages» du circuit. Comme nous cherchons des courts-circuits entre des maillages, nous assignons un sommet à chaque maillage. Les arcs représentent alors les courts-circuits potentiels (pas les courts-circuits existants, bien sûr : si nous savions où ils se trouvent, nous n'aurions pas à les chercher). Plus précisément, deux sommets du graphe de maillages sont joints par un arc chaque fois que les maillages correspondants sont «adjacents» c'est-à-dire qu'ils peuvent être connectés par une droite horizontale ou verticale, c'est-à-dire qu'ils ne traversent aucun maillage intermédiaire.

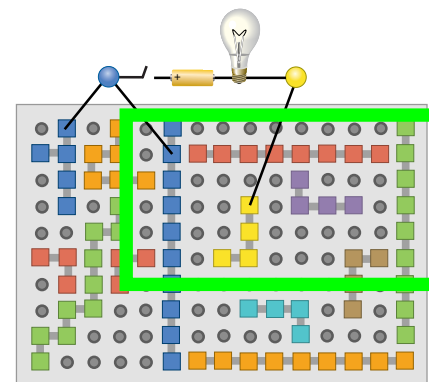
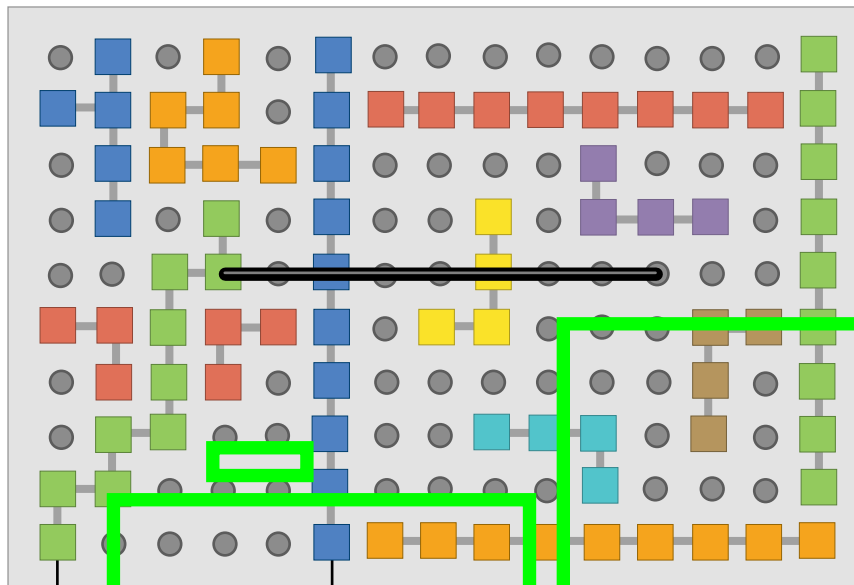
En principe, on peut imaginer des courts-circuits entre des maillages qui ne sont pas adjacents, mais des maillages adjacents seraient alors court-circuités et nous les dépisterons si nous identifions les jonctions entre les maillages adjacents. En effet, le robot de fabrication passe deux fois sur le panneau : une fois pour déposer les



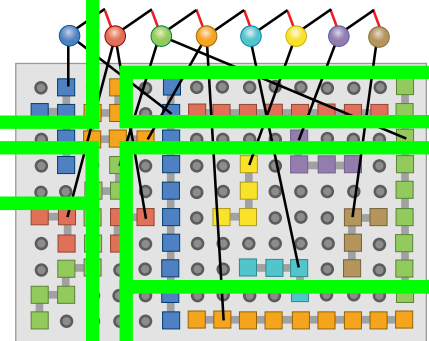
1. Ce sandwich représente un graphe d'épaisseur égale à deux : il est composé de deux graphes planaires dont les sommets respectifs ont été étirés en segments verticaux.



2. Le graphe de maillages du circuit imprimé de la figure 3 est d'épaisseur égale à deux (une unité pour chaque face de la carte). Chaque réseau y est représenté par un sommet ; les sommets adjacents sont reliés par des arcs : ce sont les courts-circuits potentiels.



4. On teste efficacement les circuits imprimés si l'on cherche des courts-circuits entre groupes de maillages d'une même couleur. En plaçant une ampoule et une pile entre les groupes de maillages bleu et jaune, on détecte un éventuel court-circuit entre les maillages de ces couleurs.



5. On réduit encore le nombre de tests en connectant les groupes de maillages.

connections horizontales, et une fois pour déposer les connections verticales. Des erreurs se produisent quand il dépose trop de matériau conducteur, reliant deux maillages qui devaient être séparés : si deux maillages non adjacents sont ainsi reliés, des maillages adjacents entre eux, le seront nécessairement aussi.

Nous avons vu que le graphe d'une carte électronique est d'épaisseur égale à deux si les deux faces comportent un circuit imprimé. Le graphe de maillages, pour la même raison, est aussi d'épaisseur égale à deux. Or le mathématicien britannique Percy John Heawood a démontré, au XIX^e siècle, que tout graphe d'épaisseur égale à deux peut être «12-colorié» : avec 12 couleurs, on peut colorier les sommets de sorte que deux sommets joints par un arc soient toujours de couleurs différentes. Ainsi le graphe de maillages de tout circuit imprimé peut être 12-colorié, et nous pouvons transférer ce coloriage (conceptuellement) aux maillages des circuits imprimés. Avec 12 couleurs, on peut donc associer une couleur à chaque maillage, de sorte que deux maillages de la même couleur ne soient jamais adjacents. Comme nous cherchons les courts-circuits entre des maillages adjacents, nous pouvons réduire nos recherches à des courts-circuits entre maillages de couleurs différentes.

Pour effectuer ces recherches, groupons tous les maillages de même couleur : pour chacune des 12 couleurs, nous construisons une «sonde», c'est-à-dire une structure arborescente réalisée en

3. Un circuit imprimé comporte des trous (cercles) où sont fixés les composants électroniques (carrés). Les composants sont reliés par des pistes métalliques en maillages. Des maillages adjacents peuvent être représentés par des couleurs différentes. Des pistes anormales qui relient des pistes adjacentes (en noir) sont à l'origine de courts-circuits. Quand on crée un circuit composé d'une lampe et d'une pile en série aux maillages bleu et vert, le courant électrique passe dans la lampe, qui s'allume.

matériau conducteur et qui relie tous les maillages d'une même couleur.

Par exemple, relierons tous les maillages bleus ensemble, d'une part, et tous les maillages jaunes, d'autre part. Puis relierons ces groupes par l'intermédiaire d'un circuit composé d'une pile et d'une ampoule en série : si le circuit n'est pas défectueux, aucun courant ne passe, car aucun des maillages bleus n'est relié aux maillages jaunes. Le courant ne passe que si une erreur de fabrication a relié un maillage bleu à un maillage jaune.

Cela nous indique pas où se trouve les courts-circuits éventuels, mais cette information n'est pas utile : les fabricants de circuits imprimés jettent généralement des cartes défectueuses sans chercher à les réparer. Aussi, pour détecter la présence d'un défaut, il suffit de tester toutes les paires possibles de sondes. Au lieu de 125 000 tests, 66 suffisent.

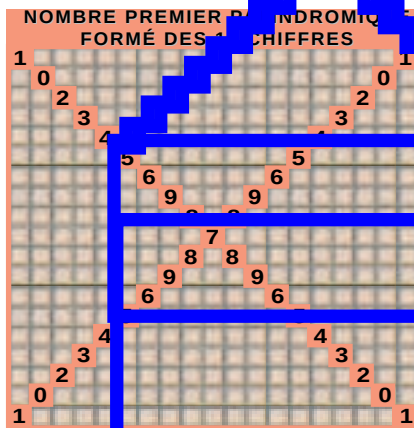
On peut même faire mieux. Testons les groupes de maillages de couleur 1 et de couleur 2 ; rejetons les cartes défectueuses. Puis, relierons ensemble les groupes de maillages de couleurs 1 et 2, et cherchons si cet ensemble est relié au groupe de maillages de couleur 3 : si la lampe s'allume, c'est la preuve que le groupe de maillages de couleur 3 est relié au groupe de maillages de couleur 1 ou au groupe de maillages de couleur 2. Or

chacun de ces deux éventualités conduit à un défaut, qui nous conduit à rejeter la carte. Nous poursuivons alors les regroupements et les tests : ainsi le nombre de tests est réduit à 11.

Allen Schwank, de l'Université du Michigan, a encore réduit ce nombre. Il écrit d'abord les nombres 1, 2, ..., 12 en binaire (de 0001 à 1100) ; puis il repère chaque groupe de maillages par un de ces nombres. Il construit un «supergroupe» composé de tous les groupes dont le numéro commence par 0 et un autre supergroupe composé des groupes dont le numéro commence par 1. Il cherche si ces supergroupes sont connectés, et élimine les cartes où ils le sont. Pour les autres, il réalise deux nouveaux supergroupes entre les groupes ayant le même deuxième chiffre de leur numérotation binaire, et il examine leur éventuelle connexion. Sinon il répète l'opération pour les troisièmes chiffres binaires, puis pour les quatrième. Et le travail s'achève ainsi. Pour com-

prendre la méthode, notons que si deux groupes distincts sont reliés par un court-circuit, leur indexation binaire doit différer par au moins un de leurs quatre chiffres ; de ce fait, un des quatre tests doit détecter les courts-circuits.

Les coloriages, un jeu d'enfant ? Peut-être, mais l'industrie électronique a intérêt que ses ingénieurs s'amuse comme des enfants.



Les chasseurs de nombres premiers

JEAN-PAUL DELAHAYE

Chaque jour, des centaines d'ordinateurs recherchent éperdument des nombres premiers.

Dans le zoo des nombres, les mathématiciens ont identifié, il y a plus de deux mille ans, une espèce remarquable, les nombres premiers (comme 2, 3, 5, 7, 11, ...) qui ne sont multiples exacts que de 1 et d'eux-mêmes. Ces nombres sont aux entiers ce que les éléments sont aux composés chimiques, car tout nombre entier se décompose de façon unique en produit de facteurs premiers. Exemple : $440 = 2 \times 2 \times 2 \times 5 \times 11$.

L'esprit de sérieux s'est emparé du sujet, et des milliers de pages de mathématiques difficiles, voire très difficiles, ont été écrites sur cette espèce numérique qui ne sera jamais considérée comme "bête" puisqu'elle est infinie et que, de toute façon, lorsqu'un nombre est premier, rien ne peut changer sa nature !

Les universitaires sont obsessionnellement attachés à la répartition des nombres premiers (quelle est la proportion moyenne des nombres premiers parmi

les nombres inférieurs à n ?) : ils s'y cassent le cerveau depuis plus de cent ans (la conjecture de Riemann, qui donnerait des informations précises de répartition échappant constamment à toutes les tentatives de preuve). Parallèlement, une secte d'amateurs est restée fidèle à la tradition des pythagoriciens qui furent sans doute les premiers à définir et à prêter attention aux nombres premiers, et à y chercher éternellements et amusements.

Les membres pacifiques et tranquilles de cette secte examinent les sous-espèces de nombres premiers, mènent toutes sortes de calculs, lancent des défis de plus en plus forts ou plus absurdes. Le tout constitue un jeu d'échecs planétaire qui s'épanouit sur Internet. Ces zoologues mathématiciens se sont particulièrement intéressés aux nombres premiers *repunits* et aux nombres premiers palindromes.

LES REPUNITS

Les *repunits* sont des nombres constitués d'une chaîne de 1. Le nombre 11 est premier. En revanche, le nombre 111 ne l'est pas car $111 = 3 \times 37$. De même, quatre "1" consécutifs ou cinq "1" ne constituent pas des nombres premiers : $1111 = 11 \times 101$ et $11111 = 41 \times 271$. Plus loin, $11...1$ (19 fois le "1") est premier comme l'est $11...1$ (23 fois le "1"). D'où la question : quels sont les *repunits* premiers ?

Cette question est loin d'être simple, et personne aujourd'hui ne connaît de règles simples permettant de savoir systématiquement et rapidement quels sont les *repunits* premiers et quels sont les *repunits* composés. Notre ignorance n'est cependant pas complète, car on a découvert quelques propriétés des *repunits*.

— Pour être premier, un *repunit* doit nécessairement comporter un nombre premier de "1". En effet, si m divise n alors $11...1$ (m fois) divise $11...1$ (n fois). On le démontre en généralisant l'égalité $111...111111111 = 1111 \times 100010001$ (ce qui est facile).

— Un nombre *repunit* ne peut être ni un carré (comme $25 = 5 \times 5$), ni un cube (comme $27 = 3 \times 3 \times 3$), ni une puissance cinquième (comme $32 = 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2$). Les deux derniers résultats sont récents, et nul ne sait ce qui se passe pour les puissances autres que les multiples de 2, 3 et 5.

Les *repunits* de petites tailles (moins de 10 000 chiffres) susceptibles d'être premiers ont été étudiés soigneusement. On peut résumer ce qu'on sait en quelques mots :

— $11...1$ (n fois le "1") est un nombre premier pour $n = 2, 19, 23, 317$ (découvert par Hugh Williams en 1978), 1031 (découvert par Hugh Williams et Harvey Dubner en 1986).

— Aucune autre valeur de n inférieure à 30 000 ne donne de *repunits* premiers. Au-delà de 30 000, les calculs deviennent trop longs, et l'on ignore donc ce qui s'y passe, comme d'ailleurs on ignore si l'espèce des *repunits* premiers est infinie.

1. REPUNITS EN BASE 2 ET NOMBRES DE MERSENNE

En base 2, les *repunits* sont de la forme $2^n - 1$. Ces nombres premiers sont dénommés les nombres premiers de Mersenne, en l'honneur du père Mersenne, qui les étudia en 1644.

Ces nombres sont particulièrement intéressants, car on connaît une méthode très efficace pour en tester la primalité. Le test de Lucas-Lehmer est basé sur le résultat suivant : $2^p - 1$ est premier si et seulement si $2^p - 1$ divise $S(p-1)$, où $S(1) = 4$ et $S(n+1) = S(n)^2 - 2$.

Grâce à ce test, le plus grand nombre premier connu est un nombre de Mersenne. Il s'agit de $2^{3021377} - 1$ (découvert en 1998 par Clarkson, Woltman et Karickhoff), qui comporte 909 521 chiffres. On espère trouver un nombre premier de un million de chiffres avant l'an 2000.

On connaît aujourd'hui 37 nombres premiers de Mersenne, qui sont ceux correspondant aux exposants : 2, 3, 5, 7, 13, 17, 19, 31, 61, 89, 107, 127, 521, 607, 1279, 2203, 2281, 3217, 4253, 4423, 9689, 9941, 11213, 19937, 21701, 23209, 44497, 86243, 110503, 132049, 216091, 756839, 859433, 1257787, 1398269, 2976221, 3021377. On ne sait prouver que les nombres de Mersenne premiers sont en nombre infini, ni que les nombres de Mersenne composés ayant un exposant premier sont en nombre infini.

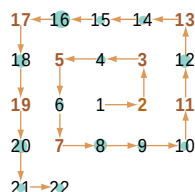
La factorisation des *repunits* est un sport plus difficile que la simple détermination de la primalité : aussi étonnant que cela paraisse, on sait prouver qu'un nombre n'est pas premier avec certitude sans pour autant donner la moindre idée de ses facteurs (voir la figure 1, où une méthode de ce type est décrite pour les *repunits* en base 2). Le nombre composé de 77 fois 1 n'est pas premier (c'est assez facile à démontrer), mais ses deux facteurs sont difficiles à identifier : l'un est un nombre premier de 30 chiffres, l'autre un nombre premier de 41 chiffres. On sait aujourd'hui factoriser tous les *repunits* jusqu'à 157 chiffres.

Les *repunits* ont la particularité évidente d'être identiques à eux-mêmes quand on inverse l'ordre de leurs chiffres. Dit autrement, ce sont des palindromes numériques. Bien sûr, il y a d'autres nombres palindromes, par exemple 12321 ou 843348.

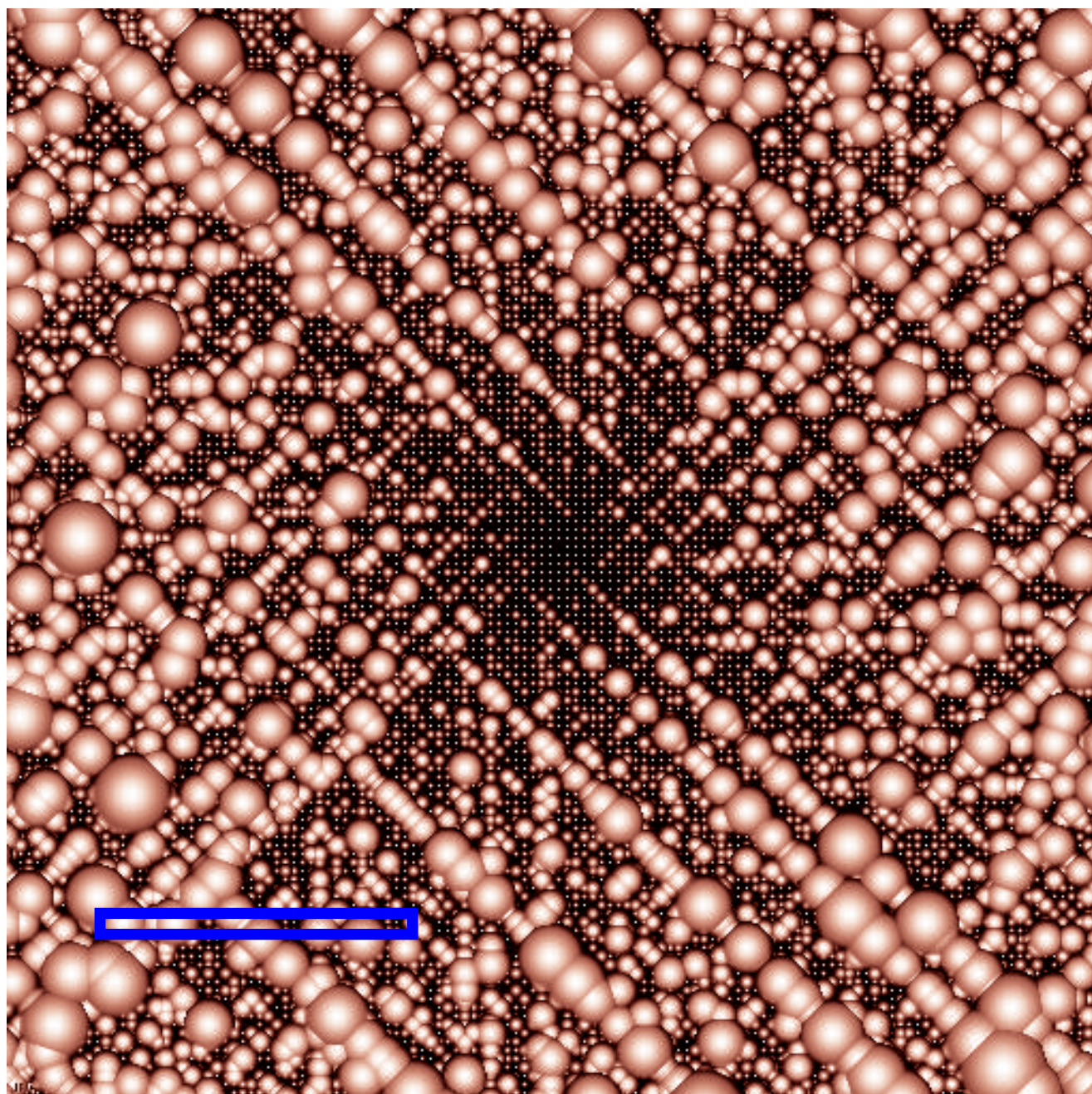
D'où la question naturelle et pressante pour tout amoureux des nombres : quels sont les nombres premiers palindromes ?

LES NOMBRES PREMIERS PALINDROMES

Il est évident que 1 est le seul nombre premier palindrome à deux chiffres (un tel nombre est de la forme XX , et donc multiple de 11). Exotique, mais vrai : il n'existe aucun nombre premier palindrome à un nombre pair de chiffres à cause du critère de divisibilité par 11 : tout nombre dont la différence de la somme de ses chiffres de rang impair et de ses chiffres de rang pair est nulle, est divisible par 11. En revanche, il existe 15 nombres premiers palindromes possédant 3 chiffres : 101, 131, 151, 181,



2. Spirale de Ulam retraitée : les nombres entiers sont inscrits à la suite les uns des autres selon une spirale carrée représentée à droite. Sur la figure ci-dessous, les diamètres des sphères associées à chaque nombre sont proportionnels au nombre de diviseurs de ce nombre. Un nombre premier se réduit à un point.



Jean-François Colonna

3. NOMBRES PREMIERS PERSISTANTS

a. Premiers permutables

Un nombre premier est permutable si, quel que soit l'ordre de ses chiffres, on obtient un nombre premier. 337 est un nombre premier permutable, car 337, 373, 733 sont premiers.

Les seuls nombres premiers permutables connus sont : 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 31, 37, 71, 73, 79, 97, 113, 131, 199, 111, 337, 373, 733, 919, 991, 11...1 (19 fois le "1"), 11...1 (23 fois le "1") 11...1 (317 fois le "1") 11...1 (1 031 fois le "1"). Il n'existe pas d'autres nombres premiers permutables ayant moins de 467 chiffres.

b. Premiers circulaires

Un nombre premier est circulaire si, lorsqu'on fait tourner ses chiffres, on obtient d'autres nombres premiers : par exemple 187, 871 et 718 sont premiers.

Les seuls nombres premiers circulaires connus sont 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 37, 79, 113, 187, 199, 337, 1193, 3779, 11939, 19939, 193939, 199933, 11...1 (19 fois le "1"), 11...1 (23 fois le "1") 11...1 (317 fois le "1") 11...1 (1 031 fois le "1").

c. Premiers raccourcissables à droite

Les nombres premiers raccourcissables à droite restent premiers quand on en coupe la fin. Ainsi le nombre 73 939 133 est le plus long des nombres premiers connus raccourcissables à droite, ce qui, par définition, signifie qu'on a la pile de nombres premiers qui est représentée à gauche.

d. Premiers raccourcissables à gauche

Les nombres premiers raccourcissables à gauche sont ceux n'utilisant pas de chiffres autres que 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. Les trois nombres premiers raccourcissables à gauche les plus longs connus sont dus à Chris Caldwell ; ce sont : 95918918997653319693967, 96686312646216567629137 et 357686312646216567629137. Ce dernier nombre donne la pile de nombres premiers représentée à gauche.

191, 313, 53, 373, 383, 727, 757, 787, 797, 919, 929. Vous remarquerez qu'aucun n'appartient aux centaines 2, 4, 5, 6 et 8 (en réfléchissant deux secondes, vous comprendrez pourquoi).

Il existe 93 nombres premiers palindromes à 5 chiffres, et 668 à 7 chiffres. Parmi ces derniers, le quadruplet suivant est remarquable : 1878781 – 1879781 – 1880881 – 1881881, car il est composé de quatre nombres premiers palindromes pris dans quatre groupes consécutifs de mille (c'est l'unique cas de ce type). La totalité des nombres premiers palindromes de 11, 13 et 15 chiffres a été calculée par Martin Eibl en utilisant le langage BASIC. Le 9 juin 1998, le décompte de ceux à 17 chiffres a été obtenu par Carlos Rivera. C. Rivera est un amateur passionné de nombres premiers ; bien que travaillant dans l'industrie des céramiques à Monterrey, au Mexique, il a mis en place le site <http://www.sci.net.mx/~crivera/home.html>, où il répertorie toutes sortes de propriétés et d'énigmes récréatives concernant les nombres premiers palindromes.

Certaines identités amusantes ont été notées par Rivera. Des identités entre des nombres premiers palindromes à 2 chiffres : $101 + 131 + 151 = 383$; entre des nombres premiers palindromes à 5 chiffres : $30103 + 30203 + 30403 = 90709$; entre des nombres premiers palindromes à 43 chiffres : $1000000000000002109952599012000000000000001 + 0021100000000000001120000000000000000001 + 1000000000000002110025200112000000000000001 = 30000000000000632977779236000000000000003$.

Cette égalité est la plus petite possible de sa catégorie (une somme de trois nombres premiers palindromes de 43 chiffres donnant un nombre premier palindrome de 43 chiffres).

Ce n'est cependant encore qu'une égalité simple à côté de celle-ci, pour laquelle on a utilisé la notation $(0)_n$ pour désigner une suite de n zéros consécutifs. Il s'agit cette fois d'une égalité entre nombres premiers palindromes de 191 chiffres (noter que 191 est aussi un nombre premier palindrome) :

$$(0)_{87}13228010892231(0)_{87}1+1(0)_{87}132300858003231(0)_{87}1+(0)_{87}13230111103231(0)_{87}1=3(0)_{87}396899979998693(0)_{87}3$$

Toujours plus fort (ou plus absurde, selon les goûts), Rivera a découvert que le nombre premier palindrome 71317 peut s'écrire de trois façons différentes comme somme de nombres premiers consécutifs :

$$71317 = 2351 + 2357 + \dots + 2579 + 2591 \text{ (29 nombres premiers)} \\ 71317 = 1163 + 10169 + 10177 + 10181 + 10193 + 10211 + 10213 \text{ (7 nombres premiers)} \\ 71317 = 14213 + 14249 + 14251 + 14281 + 14293 \text{ (5 nombres premiers)}$$

Parmi les identités farfelues, celles-ci, découvertes à propos du nombre premier palindrome 134757431, semblent miraculeuses. Ce nombre s'écrit de 3 façons différentes comme somme de puissances des nombres 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 :

$$134757431 = 1^7 + 2^3 + 3^8 + 4^5 + 5^4 + 6^2 + 7^1 + 8^9 + 9^6 \\ 134757431 = 1^7 + 2^5 + 3^8 + 4^1 + 5^2 + 6^4 + 7^3 + 8^9 + 9^6 \\ 134757431 = 1^7 + 2^8 + 3^4 + 4^2 + 5^3 + 6^5 + 7^1 + 8^9 + 9^6$$

Ce nombre est le seul possédant cette propriété. Il existe – paraît-il – un autre nombre premier palindrome qu'on peut écrire de deux façons différentes comme somme de puissances des nombres 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. Un lecteur saura-t-il le trouver ?

SUPERSTITION

Laissons-nous glisser un peu plus vers la conception pythagoricienne des nombres qui, on le sait, comportait un élément de superstition. Ne croyez-vous pas que le fait suivant, remarqué en 1998 ($1998 = 3 \times 666$) par G.L. Honaker, doit posséder une interprétation philosophique ou religieuse importante ? La somme des 666 plus petits nombres premiers palindromes est le nombre 2391951273, qui vérifie l'égalité remarquable :

$$2^3 + 3^3 + 9^3 + 1^3 + 9^3 + 5^3 + 1^3 + 2^3 + 7^3 + 3^3 = 666 + 666 + 666.$$

Ceux qui s'intéressent au nombre 666 considéré comme maléfique seront heureux d'apprendre que les nombres de la forme 10...06660...01 (appelés nombres premiers palindromes) ont été soigneusement étudiés. Le plus petit est 16661. Le suivant est : 1 000 000 000 000 000 066 600 000 000 000 000 01 = $1(0)_{13}666(0)_{13}1$ (le 13 ne devrait-il pas nous intriguer?).

Harvey Dubner, considérant que la connaissance de cette espèce particulière méritait quelques minutes de calcul, a lancé sa machine à la recherche des nombres premiers palindromes maléfiques. Il a établi que les 7 plus petits nombres de cette espèce diabolique sont ceux ayant un nombre de zéros entre le premier "1" et le premier "6" égal à 0, 13, 42, 506, 608, 2472, et 2123. Pourquoi ces nombres-là au-delà du 13? Laissons aux lecteurs le soin de proposer leurs interprétations.

Plus sérieusement – si l'ose dire – le nombre premier palindrome le plus long connu est dû au même Harvey Dubner. C'est : $1(0)_{3644463}1$ qui possède 16361 (qui est palindrome) chiffres.

Cependant, comme de nouveaux records sont régulièrement obtenus, il se peut qu'au moment où paraîtra ce texte le champion ait changé. Sur le site Internet de Patrick de Geest, vous trouverez les mises à jour de ces records et bien d'autres informations divertissantes concernant les nombres premiers palindromes : <http://www.ping.be/~ping6758/palpri.shtml>

1379 EST TRÈS PRIMÉVAL!

Mike Keith a étudié récemment la notion de nombre priméval. Vous avez sans doute remarqué que certains mots en contiennent d'autres : le mot rameau contient les mots rame, rama, eau, mare, mure, mura, mue, rue, mer, mur, mu, me, ma, au, a. Mike Keith propose de transposer cette richesse aux nombres premiers, qui, contrairement aux mots, sont universels et ne changent pas d'un pays à l'autre. Il s'est donc attaché aux nombres qui contiennent des nombres premiers.

Le nombre 1379 contient, par exemple, les 31 nombres premiers : 2, 7, 13, 17, 19, 31, 37, 71, 73, 79, 97, 137, 139, 173, 179, 193, 397, 317, 379, 397, 719, 739, 937, 971, 1973, 3719, 3917, 7193, 9137, 9173, 9371.

Passionné par cette propriété, Mike Keith définit le caractère priméval d'un nombre. Le nombre 1379 est très priméval, le nombre 4684 ne l'est pas du tout (il ne contient aucun nombre premier).

Un nombre n contenant k nombres premiers est un record priméval si aucun nombre plus petit que n n'est autant priméval que n (ne contient k nombres premiers). En utilisant son ordinateur, Keith a compté pour tous les nombres, jusqu'à 100 000, combien d'acun contenait de nombres premiers. Le nombre 2 est un record priméval. En revanche, 3 ne l'est pas, car il ne contient qu'un seul nombre premier, or 2, plus petit que 3, contient lui aussi un nombre premier. De même, aucun des nombres 5 et 7 n'est un record priméval. Le nombre 11 n'est pas un record priméval car lui aussi ne contient qu'un seul nombre premier : lui-même. Le nombre 13 est un record priméval, car il contient les nombres premiers : 3, 13, 31.

Vient ensuite 37 qui contient 4 nombres premiers, 107 (5), 113 (7), 137 (11), 1013 (14), 1037 (19), 1079 (21), 1237 (26), 1367 (29), 1379 (31), 10079 (33), 10123 (35), 10136 (41), 10139 (53), 10237 (55), 10279 (60), 10367 (64), 10379 (89), 12379 (96), 13671 (106).

Pour chaque entier k , on peut se demander quel est le plus petit n contenant exactement k nombres premiers. Voici les 30 premières valeurs trouvées : 2 (plus petit nombre contenant 1 nombre premier) ; 25 (plus petit nombre contenant 2 nombres premiers) ; 13 (3) ; 37 (4) ; 107 (5) ; 127 (6) ; 113 (7) ; 167 (8) ; 1027 (9) ; 179 (10) ; 137 (11) ; 1036 (12) ; 1127 (13) ; 1013 (14) ; 1237 (15) ; 1135 (16) ; 1136 (17) ; 1123 (18) ; 1037 (19) ; 1139 (20) ;

4. CARRÉS MAGIQUES DE NOMBRES PREMIERS

(a) Pour 100 \$ de plus

En 1987, Martin Gardner offrit 100 \$ à quiconque découvrirait le premier d'un carré magique d'ordre 3 constitué de nombres premiers consécutifs. Le pari fut gagné l'année suivante par Harry Nelson qui, utilisant un ordinateur Cray, découvrit 22 solutions dont la plus petite est :

1480	28201	1480028129	1480028183
1480	28153	1480028171	1480028189
1480	28159	1480028213	1480028141

(b) Méthode générale

D'autres carrés magiques de ce type ont été découverts récemment, qui satisfont à une condition supplémentaire : les nombres premiers utilisés sont en progression arithmétique.

Partant d'un carré magique classique composé des nombres entre 0 et 8, on construit un carré magique de taille 3 x 3 avec 9 nombres en progression arithmétique $P, P+R, P+2R, \dots, P+8R$

1	8	3
6	4	2
5	0	7

$P+R$	$P+8R$	$P+3R$
$P+6R$	$P+4R$	$P+2R$
$P+5R$	P	$P+7R$

La difficulté est de trouver des nombres premiers consécutifs en progression arithmétique (problème différent et plus difficile que celui consistant à trouver des nombres premiers en progression arithmétique). Ce problème a été l'objet récemment de progrès inattendus et depuis février 1998, à la suite d'un calcul de Manfred Toplic et Tony Forbes, on connaît une suite de 11 nombres premiers consécutifs en progression arithmétique. On peut donc construire des carrés magiques 3 x 3 composés de nombres premiers consécutifs. La raison de la suite trouvée est 210, et le nombre P est :

1009 697 4697 14247637 216 558796984032950932
4689 900 18036034177589043417033488821590672
29711.

(c) Encore le nombre 666

Pour les superstitieux, nous avons représenté ci-dessous un carré magique de nombres premiers dont la somme de chaque ligne et chaque colonne est 666 (découvert par Alan Williams). Ce carré est pandagonal, car les diagonales opposées ont elles aussi le total de 666. Exemple :

3	107	5	131	109	311	3
7	331	193	11	83	41	
103	53	71	89	151	199	
113	61	97	197	167	31	
367	13	173	59	17	37	666
73	101	127	179	139	47	666

1079 (21) ; 10124 (22) ; 10126 (23) ; 134 (24) ; 1279 (25) ; 11237 (26) ; 3479 (27) ; 10699 (28) ; 1367 (29) ; 10179 (30).

On remarquera le fait surprenant que les deux nombres consécutifs, 1135 et 1136 se trouvent dans cette liste (ainsi d'ailleurs que 1139 tout proche).

Mike Keith s'est aussi demandé quel était le plus petit nombre premier contenant tous les nombres premiers de k chiffres (qu'il appelle nombres premiers k -primévaux). – 2357 est le plus petit nombre premier 1-priméval : il contient tous les nombres premiers d'un chiffre.

– 1123465789 est le plus petit nombre 2-priméval : il contient tous les nombres premiers de deux chiffres (11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, 37, 41, 43, 47, 53, 59, 61, 67, 71, 73, 79, 83, 89, 97) et c'est le plus petit ayant cette propriété ; – 101122334455667788997 est le plus petit nombre 3-priméval ; – 10011122333444555666777998889 est le plus petit nombre priméval.

Qui calculera le suivant ?

NOMBRES ÉCONOMES ET PRODIGES

Entre l'amusement et les mathématiques sérieuses, le pas est vite franchi, comme le montre l'exemple des nombres économes, récemment introduit. Ces nombres se trouvent liés à la notion de complexité de Kolmogorov et à des conjectures puissantes de théorie des nombres formulées depuis longtemps.

Bernardo Recaman Santos a proposé d'appeler équidigital un nombre dont la factorisation en nombres premiers demande le même nombre de chiffres que son écriture décimale. Exemples : $162 = 7 \cdot 3^4$; $15 = 3 \cdot 5$. Il appelle de même économe un nombre dont la factorisation demande moins ou autant de chiffres que l'écriture décimale. Exemples : $1024 = 2^{10}$; $492075 = 3^9 \cdot 5^2$. Il dénomme alors, bien sûr, prodiges les nombres pour lesquels l'écriture en facteurs premiers est aussi coûteuse ou plus coûteuse que l'écriture décimale usuelle. Exemples : $34 = 2 \cdot 17$; $140 = 2^2 \cdot 5 \cdot 7$. Ces définitions rappellent celles de nombre simple au sens de Kolmogorov, qu'on définit en considérant le moyen de codage le plus économique qui représente un nombre.

Les nombres 13, $14 = 2 \cdot 7$, $15 = 3 \cdot 5$, $16 = 2^4$, 17 constituent une suite de

5 nombres entiers consécutifs économes. Les définitions dépendent de la base de numération, mais les résultats que nous présentons ici en base 10, par souci de simplification, s'étendent aux autres bases de numération.

Constatant la présence régulière de nombres prodiges, R. Pinch s'est demandé s'il était possible qu'existent de longues séquences d'entiers successifs qui soient tous économes. On trouve une suite de 7 nombres économes consécutifs entre 157 et 163, parmi les petits entiers, mais rien de plus.

Dans un article de février 1998, R. Pinch, du *Queens' College*, à Cambridge, a réussi à lier ce problème à une célèbre conjecture mathématique concernant les nombres premiers : la conjecture de J. Dickson. Cette conjecture (énoncée en 1904) est un peu compliquée mais sa puissance mérite qu'on la considère avec sérieux. La conjecture de Dickson (non démontrée aujourd'hui) stipule que :

Pour toute suite a_i , et b_i ($i = 1, \dots, k$) d'entiers, il existe une infinité de valeurs de n telles que tous les nombres $(a_1n + b_1)$, $(a_2n + b_2)$, ..., $(a_kn + b_k)$ soient simultanément des nombres premiers, si et seulement si il existe un entier d qui, pour tout n , divise le produit $(a_1n + b_1)(a_2n + b_2) \dots (a_kn + b_k)$. Pour k égal à 1, la conjecture indique que, si

les nombres $a_1n + b_1$ ne sont pas tous multiples d'un même nombre d quand n varie, alors il existe une infinité de nombres premiers de la forme $a_1n + b_1$. Cet énoncé implique immé-

diatement le théorème de Dirichlet (lui est démontré) : si a_1 et b_1 sont premiers entre eux, alors il existe une infinité de nombres premiers de

la forme $a_1n + b_1$.

La conjecture de Dickson est un énoncé puissant qui, si on le démontrait, donnerait la solution d'une multitude de problèmes concernant les nombres premiers, en particulier la solution du problème des nombres premiers jumeaux : démontrer qu'il existe une infinité de nombres premiers séparés de 2 (comme 17 et 19) ; du problème des nombres de Mersenne composés : démontrer qu'il existe une infinité de nombres composés de la forme $2^n - 1$, avec n premier.

Pinch a établi, à partir de la conjecture de Dickson, qu'il existe des suites de nombres consécutifs économes aussi longues qu'on veut. De même, il existe des suites de nombres consécutifs prodiges aussi longues qu'on veut. Bien que reposant sur une conjecture non démontrée (et ne constituant donc pas une preuve complète), son travail correctement exploité a conduit à découvrir numériquement une suite de neuf nombres consécutifs économes allant de 1034429177 à 1034429177995381255, et qui sont indiqués sur le site web de *Pour la Science*.

Il n'est pas certain que ces neuf nombres économes consécutifs soient les plus petits possibles. Un lecteur aura-t-il le courage de se lancer dans la recherche de la plus petite solution ?

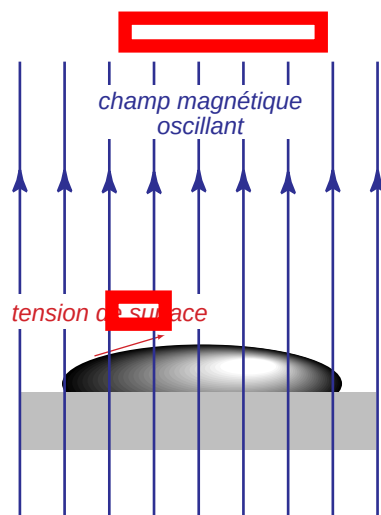
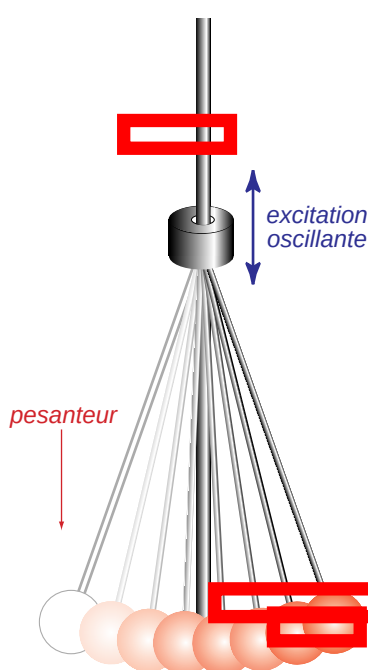
e	a	n	L	i	l
			e		
a			u		a
			i		i
			D ELA-		
			e s t p		
			r o f e s s e u r		
			:		
			d	e	i
			a		h
			n		e
			a		
			y		
			@		
			e	i	f



Les gouttes et le chaos

S. DAUGAN • Y. FAUTRELLE • J. ETAY

Des gouttes de mercure oscillent dans un champ magnétique.



Les photographies de la page de droite représentent des gouttes de mercure placées sur un support horizontal dont on a traité la surface pour minimiser les frottements. Les gouttes sont soumises à un champ magnétique vertical et alternatif, de fréquence inférieure à dix hertz. Elles oscillent : ce mouvement est ce que l'on nomme une « instabilité paramétrique ».

On observe une telle instabilité quand un pendule oscille sans frottement, autour d'un point de suspension soumis à un mouvement alternatif vertical et de petite amplitude. Quand le point de suspension monte, la masse du pendule est accélérée vers le haut : cette accélération s'ajoute à celle de la pesanteur ; l'accélération totale diminue quand le point de suspension descend. Le mouvement du pendule dépend de la différence entre la fréquence propre (celle de l'oscillation sans mouvement du point de suspension) et la fréquence de l'oscillation du point de suspension.

Quand la fréquence du mouvement du point de suspension est égale à la fréquence propre, le phénomène de résonance se manifeste ; les oscillations sont renforcées, et le pendule oscille alors à une fréquence moitié de la fréquence propre.

Quand la fréquence du mouvement du point de suspension est voisine de la fréquence propre du pendule, le comportement observé dépend de l'amplitude de l'oscillation du point de suspension. Lorsque cette amplitude est petite, le comportement du pendule est « quasi périodique » : la fréquence de son mouvement est une superposition de sa fréquence propre et d'autres fréquences, invisibles à l'œil nu, qui s'ajoutent à la fréquence propre. Pour une grande amplitude, la trajectoire du pendule devient imprévisible : le mou-

vement de la masse du pendule est chaotique.

Revenons aux gouttes de mercure dans un champ magnétique variable. Le métal, conducteur de l'électricité, est le siège de courants électriques induits, nommés courants de Foucault. Ces courants interagissent avec le champ magnétique : des forces dites de Lorentz apparaissent.

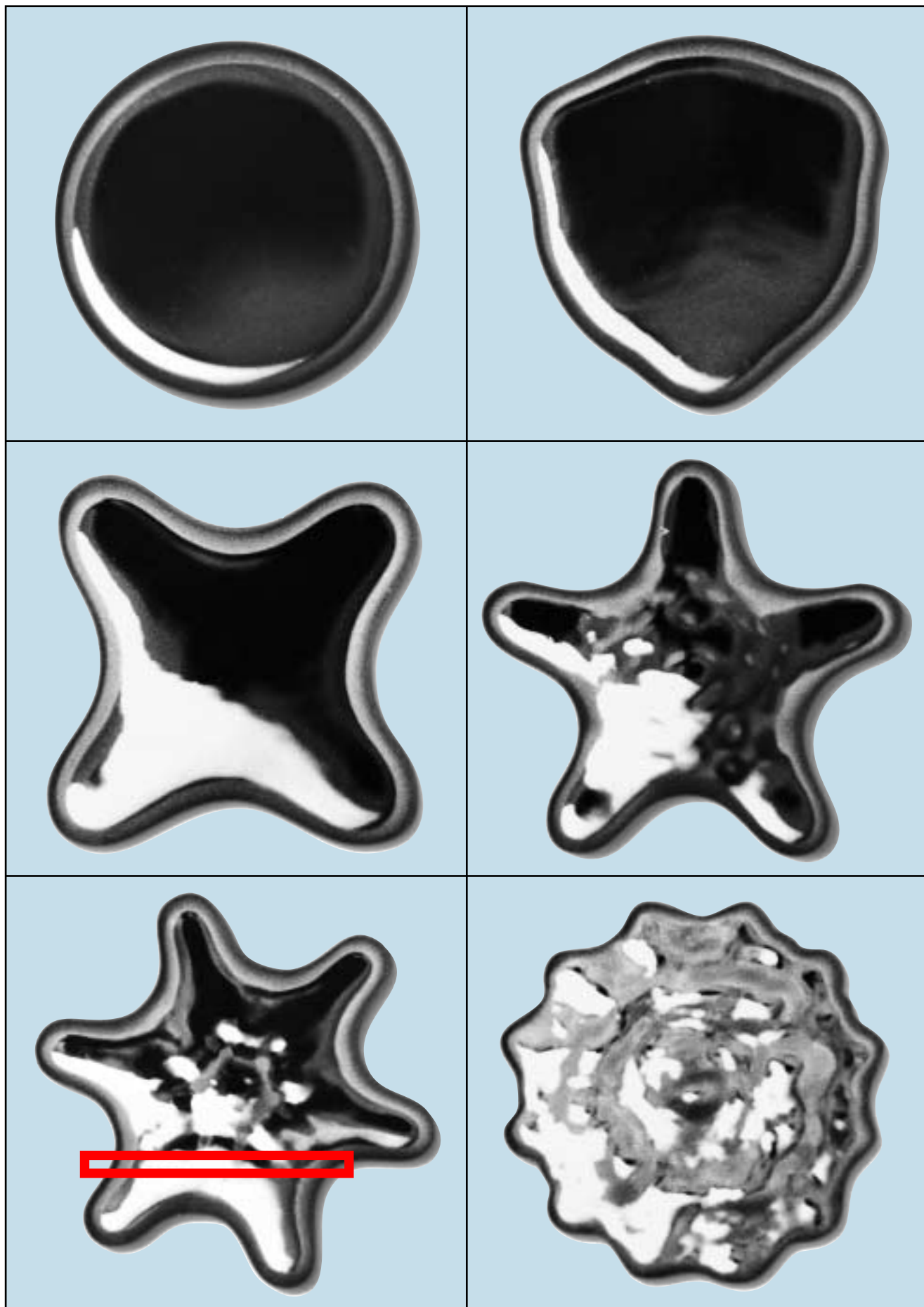
Ces forces sont responsables de déformations de la surface du mercure. Dans l'industrie, où les forces de Lorentz peuvent servir à déformer la surface des bords de métaux en fusion, la connaissance de ces déformations est importante.

En quoi la description du pendule se retrouve-t-elle ici ? La surface du métal est soumise à la tension de surface, qui agit de façon similaire à la force de gravitation sur le pendule pour ramener sa masse à l'équilibre, vers la position la plus basse. Les forces de Lorentz sont l'équivalent du mouvement d'oscillation du point de suspension.

Et c'est ainsi que l'on obtient les images présentées ici, en changeant la fréquence et l'intensité du champ magnétique vertical qui est appliqué aux gouttes. Les gouttes se déforment, et par brisure de symétrie, on voit apparaître des modes de vibrations de divers ordres, comme on en observe dans le mouvement du pendule.

Quand l'intensité est excessive, le chaos apparaît (image en haut à gauche).

Yves FAUTRELLE est professeur à l'INP de Grenoble. **Jacqueline ETAY** est chargée de recherche au CNRS, dans le Laboratoire EPM-MADYLAM. **Sandrine DAUGAN** a travaillé dans ce laboratoire.



Photographies Y. Faurelle, J. Esay et S. Daugan

Cosmologie

Les mirages de la création

Michel Riordan et David Schramm
(traduction : Élisabeth Vangioni-Flam). Éditions Albin Michel, 1998.

La cosmologie du Big Bang est l'un des chefs-d'œuvre intellectuels de ce siècle. Elle suscite légitimement l'enthousiasme du plus large public, mais les recherches scientifiques sur le passé le plus lointain de l'Univers ne se laissent pas aborder sans précautions, sous peine de graves confusions. Une initiation est nécessaire pour en saisir toutes les dimensions physiques et épistémologiques. David Schramm, l'un des astrophysiciens les plus renommés du moment, professeur à l'Université de Chicago, et Michel Riordan, éditorialiste réputé, nous guident dans l'espace-temps, jusqu'aux jours orageux de l'enfance de l'Univers.

Cet exposé cristallin nous conduit au lieu de confluence de la cosmologie et de la physique des particules. Ces théories reines, aussi éloignées que l'on puisse l'imaginer, puisque traditionnellement réservées aux deux infinis, grand et petit, trouvent aujourd'hui un champ d'application commun dans les tout premiers instants descriptibles de l'histoire de l'Univers. Par une compréhension graduelle

des concepts mis en jeu dans les théories physiques fondamentales, ainsi que de leur symbiose dans l'Univers primordial, le lecteur est amené à une vision véritablement synthétique de la nature, sans petit, sans la clef du grand.

L'accélérateur de particules devient un outil de la cosmologie, car il permet de reproduire les conditions énergétiques de l'Univers primordial, lequel peut être représenté comme un océan tumultueux de particules élémentaires en collision. De fait, l'Univers, dans les premières étapes de son développement, est un somptueux laboratoire de physique des hautes énergies. À des températures de plusieurs milliards de degrés, quarks et gluons, matière et antimatière, ainsi que des particules dont la nature nous est encore inconnue, se conjuguent pour fonder le monde matériel. La cosmologie est en révolution !

Cet ouvrage est une bénédiction pour ceux qui veulent capturer l'essence des grandes questions cosmologiques du xx^e siècle : la création de la matière, l'inflation cosmologique, l'origine des éléments, la naissance des galaxies et des grandes structures et surtout le mystère de la matière noire (transparente), omniprésente dans le cosmos. Est-elle constituée de protons et de neutrons, comme vous et moi, ou d'autres particules, plus subtiles ? Les tenants et les aboutissants de la quête de la substance de l'Univers sont exposés en grand détail, y compris les méthodes observationnelles et expérimentales destinées à lever l'ambiguïté de la nature de la matière noire.

Écrit dans une langue efficace et directe excluant les effets facies, cet ouvrage se distingue par la profondeur de son analyse, par son intransigeance pédagogique et par son audace conceptuelle. Le merveilleux ne naît point du désir d'étonner, mais, tout au contraire, de l'obstination des auteurs à se faire comprendre. Et ils y parviennent remarquablement. Jamais livre de cosmologie destiné à une large audience ne fut plus puissant, plus honnête et plus généreux.

Ce livre est d'autant plus émouvant que D. Schramm a disparu, l'an dernier, à la suite d'un tragique accident d'avion.

Élisabeth Vangioni-Flam, de l'Institut d'astrophysique de Paris, ayant collaboré directement avec D. Schramm, a donné une traduction fidèle et respectueuse de ce qui constitue l'incalculable testament scientifique d'un des plus grands astrophysiciens de notre époque.

Michel CASSÉ

Épistémologie

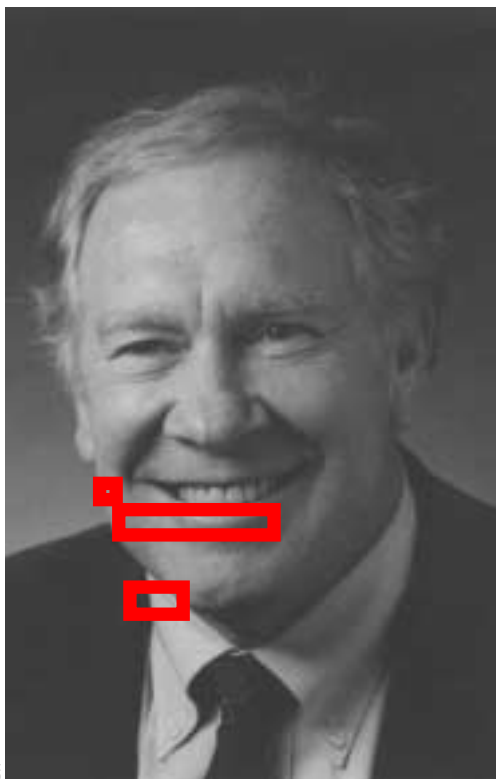
La culture est-elle naturelle ? Histoire, épistémologie et applications récentes du concept de culture

Sous la direction d'Albert Ducros, Jacques J. Ducros et Frédéric Joulia. Éditions Errance, 1998.

Cet ouvrage collectif, qui réunit les contributions de paléanthropologues, d'anthropologues, d'archéologues, d'éthologues et d'historiens des sciences, constitue une réflexion sur l'origine et les fondements de la culture.

La première partie du livre est consacrée à l'histoire du concept de culture ; la seconde à son évolution, aussi bien dans son extension que dans sa compréhension, en prenant notamment en compte l'utilisation d'outils chez les chimpanzés. L'évocation des principaux thèmes traités comportera une idée de l'ampleur et des contours du débat : la naturalisation de l'homme, de Linné à Darwin, c'est-à-dire son insertion dans l'histoire naturelle ; sa dénaturalisation dans l'ethnologie française au début du siècle ; les interprétations de la notion de culture chez les préhistoriens de la seconde moitié du xix^e siècle ; l'évolutionnisme culturel, qui défend l'idée que l'humanité se serait progressivement civilisée en s'extirpant d'un état naturel, donc barbare et animal ; la question de la culture dans la sociobiologie (dans le cadre d'une biologisation de l'ensemble des comportements sociaux que devient le dépassement des déterminismes naturels ?) ; l'hypothèse d'un enlèvement de la culture par les contraintes naturelles ; les lectures anthropologiques du passage de noix chez les chimpanzés ; l'usage qu'ils font de produits curatifs ; la possibilité de traditions chez les singes sont autant de possibilités qui bousillent le concept de culture, au point de remettre en question son caractère strictement anthropologique. Bref, de ne plus en faire le propre de l'homme.

Que l'humanité commence avec la culture est le postulat fondateur de la différence anthropologique. Le titre, *La culture est-elle naturelle ?*, contient tout le problème. En effet, l'idée de culture ne se soutient que de son opposition essentielle à la nature, et c'est dans cette scission que prend place la ligne de partage entre l'humanité et l'animalité. Aussi



DR

David Schramm.

parle-t-on d'êtres de culture, voire d'antiquité, pour qualifier les uns ; d'êtres de nature pour désigner la soumission des seconds à des déterminismes implacables. C'est la notion de perfectibilité qui sous-tend celle de culture, et l'on comprend pourquoi cette manière vaut comme différence suprême : en permettant à l'individu de quitter un état répétitif, la culture ouvre un champ de possibilités infinies. On peut donc inclure dans la culture toutes les capacités intellectuelles et spirituelles, *ipso facto* exclusivement humaines.

Peut-on continuer à borner le phénomène culturel à l'espèce humaine ? Telle est donc la question à laquelle des éléments nouveaux, présentés dans ce livre (en primatologie, notamment) conduisent. L'inaliénabilité du conflit de deux idéologies, le biologie et le culturalisme, incapables d'affronter la complexité des données observables, est mise en évidence. On apprend que les écrits des explorateurs portugais du XVI^e siècle attestaient déjà des comportements de cassage de noix de palme par les chimpanzés de la Sierra Leone. Cependant il faudra attendre l'observation, faite par des primatologues japonais dans les années 1950, d'un macaque lavant ses patates douces dans un ruisseau pour qu'une réflexion sur l'existence d'une pré-culture chez les primates soit posée, avec tous les bouleversements théoriques que cela entraîne. Par le terme « cultures chimpanzé », il faut entendre des processus d'apprentissage et de transmission ; cela suffit-il à faire de la culture ? Peut-on utiliser un concept importé d'un champ où il désigne ce qui est humain, précisément en tant que non animal ?

La difficulté qu'il y a à s'interroger sur ce qui est fondateur – en l'occurrence, la différence entre l'humanité et l'animalité que révèle le concept même de culture – est évidente. Cela a eu pour conséquence d'écarter d'emblée la question de son éventuelle apparition dans d'autres lignées d'hominidés.

La dernière contribution met au jour l'impact sur les théories scientifiques de la tradition onto-théologique occidentale, qui, d'âge en âge, s'est montrée toujours plus soucieuse de souligner l'unicité et la dignité exclusive de l'humain. Se retrouvent dans les sciences des positions métaphysiques, le plus souvent implicites, qui affectent l'orientation des recherches et des résultats. Aussi la question d'une possible continuité entre les singes et l'homme reste-t-elle taboue. On peut donc saluer cette entreprise où sont rassemblés les premiers jalons d'une appréhension qui se veut dégagée de l'obsession du propre de l'homme.

Florence BURGAT

Entomologie

Les insectes et la forêt

Roger Danz, Éditions Tec et Doc, 1998.

Nombre d'insectes ont trouvé dans l'écosystème forestier des conditions de vie qui ont favorisé leur diversité. Depuis longtemps s'intéressent, tant par la variété de leurs mœurs que par leur importance économique.

En Europe, l'entomologie forestière a connu ses pionniers avec J.T.C. Ratzeburg qui a publié, en Allemagne, une œuvre monumentale (de 1837 à 1844) et, chez nous, avec Édouard Perris et son *Histoire des insectes du pin maritime* (1851 à 1862 et 1870). Puis les travaux se sont multipliés, surtout consacrés aux espèces nuisibles et aux problèmes de protection des forêts, avec des traités comme celui de l'Allemand K. Escherich (1913-1940) et celui du Suisse A. Barbey (1925). Aujourd'hui se développent principalement des études sur la place et sur le rôle des insectes dans le fonctionnement de l'écosystème des forêts tempérées. Ce sont surtout ces aspects qui font l'intérêt de cet ouvrage, qui révisé celui que cet auteur avait publié en 1980.

Les facteurs écologiques qui déterminent l'abondance et la répartition des insectes sont de diverses natures ; les uns dépendent des êtres vivants (fac-

teurs biotiques), les autres sont physico-chimiques (facteurs abiotiques). Parmi ces derniers, on reconnaît les éléments du climat : éclaircissement ; température ; pluviosité ; vent ; feu, comme agent catastrophique ; les modifications physiques comme les réductions de surface et la fragmentation des massifs ; enfin des variations globales dues aux pollutions (comme les pluies acides). Quant aux premiers, les facteurs biotiques, ils sont particuliers dans les forêts, étant donné la grande longévité des arbres et la multiplicité des microclimats, d'où une extrême diversité des organismes animaux, qui favorise la compétition et les antagonismes, entraînant une régulation des populations.

Dans ce domaine, l'émergence d'une écologie moléculaire – avec les notions de défense chimique des plantes, de communication entre végétaux attaqués ou de stimulation de croissance par la phytophagie – ouvre de nouveaux horizons. C'est ainsi que les substances qualifiées de « composés secondaires des plantes » (comme certains alcaloïdes, des terpènes, des tannins...) sont considérés comme des moyens de défense chimique contre les attaques d'insectes.

La diversité des habitats forestiers autorise à distinguer des ensembles d'espèces, ou guildes, occupant les mêmes biotopes et exploitant les mêmes ressources. Voici les principales d'entre elles. Les frondicoles évoluent dans la frondaison (ou canopée), au milieu du feuillage, et sont principalement des exploiters de feuilles : broyeurs, mineurs, suceurs de sève, gallicoles, mycophages,



Un coléoptère Cérambycide, *Plagionotus arcuatus*, sur une souche de chêne. La larve qui se développe dans le bois peut assimiler la cellulose grâce à la présence, dans son tube digestif, de mycétomes, ou « cryptes à levure ».

Jacques d'Aguilar

ditritivores... Ils sont accompagnés de leurs prédateurs et parasitoïdes. Les insectes des méristèmes vivent dans les bourgeons ou dans le cambium. Comme leur activité peut déborder sur les tissus voisins, ils sont souvent regroupés avec les corticoles, stricts mangeurs de phloème, dont les coléoptères Scolytidés sont les plus connus. Les xylophages s'attaquent au bois, ou xylème. En réalité, peu nombreux sont les insectes capables de dégrader la cellulose ; la plupart le font surtout par l'intermédiaire de micro-organismes symbiotiques (champignons, protozoaires, bactéries) installés dans leur tube digestif. À cette catégorie s'ajoutent les nombreuses espèces vivant dans le bois décomposé : les saproxylophages, tels des coléoptères Cérambycidés, Buprestidés, Curculionidés, Elatérédés... ; des diptères Tipulidés, Asilidés... ; des hyménoptères comme les Formicidés.

Le bois représente, dans la forêt, une biomasse presque aussi importante que les feuilles, mais, tandis que les

feuilles se renouvellent chaque année et se réduisent au sol rapidement, le bois est un matériau lentement dégradable et dont la décomposition s'opère sur plusieurs années, voire plusieurs décennies. On note alors une succession de faunes occupant ce biotope au cours de sa transformation. Parmi les autres guides, notons les radicoles, qui occupent le système racinaire ; les mycétophages, qui consomment les champignons lignicoles ; enfin la faune du sol et des litières, qui participent à l'humification et à la minéralisation.

Aujourd'hui une bonne gestion forestière devrait satisfaire aux objectifs suivants : produire du bois, entretenir un espace de loisir, protéger la biodiversité. C'est pourquoi cet ouvrage sera une référence pour tous les gestionnaires de forêts (propriétaires, Office national des forêts) et tous les naturalistes amoureux de cette sylvie chargée de réminiscences et dont l'utilité tend à s'accroître devant l'ampleur des pollutions.

Jacques d'AGUILAR

Histoire des sciences

Copernic et la révolution copernicienne

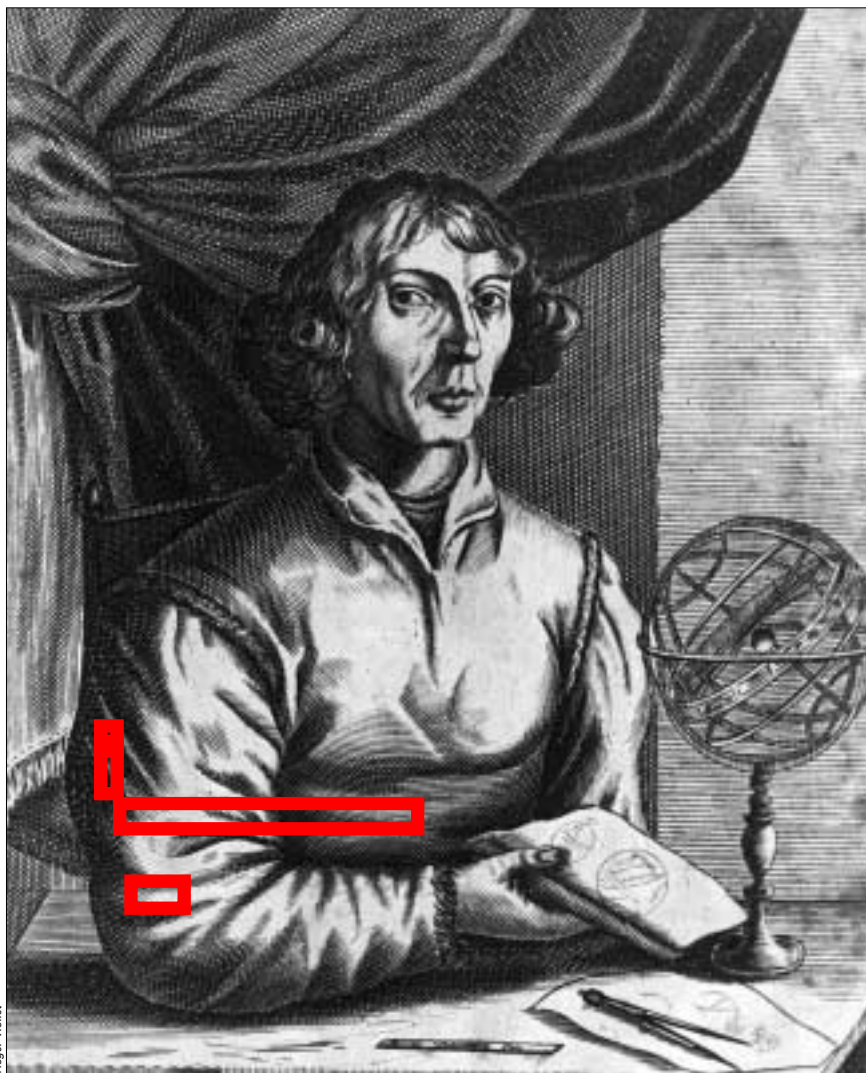
Jean-Jacques Szczeciniarz.
Éditions Flammarion, 1998.

« Il semble que l'on sache tout sur Copernic » : cette première phrase de ce volumineux ouvrage est une contrevérité !

L'œuvre et la vie de Copernic restent bien imparfaitement connues ; on ignore notamment comment est né le modèle copernicien du cosmos. Pourquoi Copernic a-t-il mis les planètes en mouvement autour du soleil ? Mystère...

Le titre de l'ouvrage, d'autre part, est trompeur : le livre ne donne ni une biographie de Copernic, ni une présentation des problèmes qui agitent les astronomes du début de la Renaissance, ni d'ailleurs une étude sur la diffusion des idées coperniciennes. Pourtant les mécanismes de cette diffusion sont d'un intérêt capital pour qui s'intéresse à la révolution copernicienne. Certaines questions sont survolées, voire ignorées, alors qu'elles auraient mérité de larges développements. Citons, par exemple, le rôle de Rhéticus (1514-1574), unique élève de Copernic, qui a décidé son maître à publier ses *De revolutionibus* et qui, lui-même, a annoncé les théories héliocentriques dans sa *Narratio prima*, celui d'Érasme Reinhold et de ses *Tables pruteniques* (les premières tables astronomiques fondées sur les modèles coperniciens, et qui ont assuré la diffusion des découvertes coperniciennes dans la communauté astronomique), la réception par l'Église de *De revolutionibus*, puis sa mise à l'index en 1616, la faiblesse des observations astronomiques dans l'établissement d'une description du mouvement des planètes, la distinction entre copernicien calculateur et copernicien cosmologiste, etc. De surcroît, l'auteur présente les travaux de l'école islamique de Maragha comme un acquis dans la genèse des théories héliocentriques sans préciser que cette thèse est loin de faire l'unanimité parmi les historiens des sciences.

Le but de cet ouvrage n'est donc pas la synthèse des travaux sur la révolution copernicienne, mais l'étude de certains aspects. Le livre s'adresse plus aux philosophes qu'aux scientifiques, l'auteur s'intéressant surtout aux conséquences de la mise en mouvement de la Terre, c'est-à-



Roger Viollet

Nicolas Copernic (1473-1543).

dire au passage du géocentrisme à l'héliocentrisme. Son analyse ne manque pas de justesse, mais on ne perçoit pas toujours la finalité de ses propos, d'autant qu'il utilise une argumentation parfois obscure.

La lecture de l'ouvrage apportera peut-être quelques éléments de réflexion à ceux qui possèdent une bonne connaissance des problèmes liés à l'astronomie ptoléméenne et copernicienne.

Denis SAVOIE

Éducation

Enfants, chercheurs et citoyens

Sous la direction de Georges Charpak. Éditions Odile Jacob, 1998.

Est-ce ou non, un paradoxe ? Jamais la science n'a accumulé autant de succès qu'aujourd'hui, jamais les techniques qui en dérivent n'ont fait la preuve d'autant de virtuosité ; et, dans le même temps, jamais sans doute n'a-t-on porté, sur les différents systèmes d'enseignement des sciences, un regard aussi méfiant, voire aussi critique. Au Japon, aux États-Unis, en France, pour citer trois pays différents mais non particulièrement retardataires en matière de recherche ou de techniques, on s'inquiète et l'on s'interroge. Ainsi chez nous : comment l'enseignement des sciences et des techniques est-il perçu ? Pourquoi tant d'élèves de nos lycées s'en désintéressent-ils ? Pourquoi les filières universitaires correspondantes voient-elles leur clientèle s'amoindrir ? Et pourquoi le marché juteux des supercheries pseudo-scientifiques aux relents au mieux mercantiles, au pire sectaires, est-il toujours aussi florissant ?

Le livre que propose Georges Charpak ne prétend pas théoriser sur le sujet, mais bien plutôt présenter, avec quelque détail, trois situations concrètes dans les trois pays précédemment mentionnés.

Aux États-Unis, le physicien Leon Lederman – qui a promu, en banlieue de Chicago, une méthode d'enseignement des sciences expérimentales dans les écoles primaires des quartiers les plus défavorisés – a aussi œuvré à la rénovation de cet enseignement au niveau du secondaire. La commission qu'il a animée, partant d'une situation considérée comme inquiétante (*nation at risk*), propose un ensemble de réformes, ici présenté dans son intégralité. Le texte est vif, ne s'appuie sur aucun préalable

doctrinaire et recommande l'instauration d'un « tronc commun » physique-chimie-biologie, où les trois matières soient enseignées en étroite corrélation, favorisant l'observation, la collecte de données, le travail en groupes, et encourageant les discussions technologiques.

À titre expérimental, un lycée (*high school*) fonctionne, près de Chicago, pour des élèves rigoureusement sélectionnés. Cette école d'élite (l'IMAS, ou Académie de mathématiques et de sciences de l'Illinois) fait l'objet d'une visite passionnante, guidée par Marc Burgess, Daniel Mangili, Alan Maruani et Damien Polis, qui nous entraînent dans les classes, nous font rencontrer professeurs, élèves (de l'âge de nos lycéens), présidente... Les auteurs nous font aussi participer à ces travaux de groupe sur un thème pluridisciplinaire (tel « le magnétisme sur la Lune ») où se mêlent discussions, expériences, calculs, interrogations sur le réseau internet... Nous sont décrits l'atmosphère tournée vers l'investigation, le rôle des mentors (personnalités extérieures à l'établissement, qui épaulent, dans leur spécialité, élèves ou groupes), la vie en communauté. Je ne puis moi-même témoigner, pour avoir visité ce lycée d'exception, de l'atmosphère singulièrement stimulante qui y règne. En parallèle, le livre nous présente enfin une expérience proche de la précédente, lancée par l'École nationale supérieure des télécommunications, vivant exemple d'une des nombreuses initiatives des nos Grandes Écoles pour élargir l'horizon de leur enseignement des sciences.

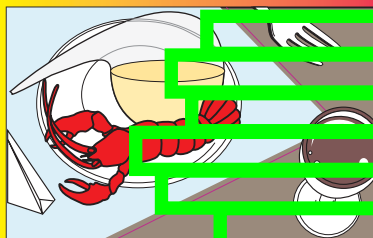
On connaît l'expérience de *La main à la pâte* telle que, en France, Georges Charpak l'a lancée en 1996 dans quelques centaines (aujourd'hui quelques milliers) d'écoles primaires. Inspirée par l'exemple des écoles de Chicago et nourrie par de nombreuses initiatives françaises antérieures brillantes mais souvent isolées, *La main à la pâte* se fonde sur l'observation, l'expérimentation et l'argumentation, que les enfants mènent autour d'un objet ou d'un phénomène. René Garassino, Yves Jamin, Alain Midol et Renée Midol présentent un très bel exemple du développement concerté de cette méthode dans la ville de Vaulx-en-Velin, où tout un ensemble d'accompagnements (salle de découverte, mallettes de matériels « parrains » scientifiques lyonnais, liens avec les parents...) a été mis en place. L'histoire de Soumia, une élève en grande difficulté (expression et résultats scolaires) qui se révèle dans les sciences, éclaire d'une touche émouvante cette action, qui est celle de presque tout le système d'enseignement primaire de la ville.

C'est au Japon que nous emmène Sophie Ernst, pour une fort intelligente

FRANCE INFO
et
POUR LA SCIENCE
vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monmécourt.

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 27 avril 1999.

FRANCE

info

visite d'une école primaire en banlieue de Tokyo. Avec sa double marque, française pour sa structure à la Jules Ferry, américaine pour l'autonomie qu'il offre et son libéralisme, l'enseignement primaire japonais a longtemps fait des merveilles, du moins à l'issue des tests internationaux, notamment en sciences. Pourtant nos amis japonais critiquent de plus en plus la tendance au bachotage et à l'accumulation statique des savoirs. Il reste que tout ce que nous y percevons, en matière d'activités expérimentales ou d'interaction avec les familles, ou de qualités de l'instrumentation, etc., donne plus l'envie de s'en inspirer qu'à s'en détourner.

Encadrés par une introduction et une conclusion de G. Charpak, où l'on retrouve sa foi contagieuse et sa vigueur intellectuelle, ces diverses études, toutes écrites avec une conviction manifeste, constituent un outil presque indispensable, tant par les idées agitées que par les exemples présentés, pour quiconque se consacre à la rénovation de nos enseignements scientifiques.

YVES QUÉRÉ

Physiologie

Géographie des odeurs

Ouvrage collectif sous la direction de Robert Dulau et Jean-Robert Pitte, collection «Géographie et Cultures» Éditions L'Harmattan, Paris, Montréal, 1997.

On n'a jamais tant désodorisé qu'à notre époque. Le seuil d'intolérance olfactive de nos contemporains semble s'abaisser régulièrement dans les sociétés économiquement avancées. Les «mauvaises» odeurs sont visées en premier, mais comme la bonne odeur des uns est souvent une mauvaise odeur pour les autres, nous pourrions bien être tentés d'atteindre cette fadeur et cette monotonie des espaces qu'Edward Hall constate aux États-Unis et dont il déplore qu'elle «prive notre vie quotidienne d'une source appréciable de richesse et de variété». Dans le même temps, et sans doute en réaction contre les excès de la tendance dominante, un regain d'intérêt se manifeste pour un sens bien mal connu.

L'ouvrage collectif publié sous la direction de Robert Dulau et Jean-Robert Pitte, *Géographie des odeurs*, est un nouvel exemple de cet intérêt. Plaidoyer auprès des géographes, il se propose d'enrichir

la description de l'espace par la prise en compte des odeurs qui le marquent. «Ce qu'Alan Corbin a étudié en historien sur la France, pourquoi ne pas le tenter en géographes?» La géographie sensorielle que dessine au fil des chapitres est une géographie humaine, une ethnogéographie, et ce n'est pas sans étonnement que l'on réalise à quel point les odeurs si fortement associées aux fonctions biologiques les plus primitives, si proches de la nature, sont de remarquables révélateurs de culture. Ce que le livre nous dit et nous montre sur plusieurs tons et dans une assez large variété de styles, c'est que les odeurs, indices de l'exercice des petits métiers comme de l'essor des grandes industries, témoins et acteurs des rites et des fêtes, sont, pour le meilleur et pour le pire, les révélateurs des activités humaines.

C'est un texte d'André Siegfried de 1947 qui donne la note de l'ouvrage dans une première partie où se trouvent associées une interrogation sur les universaux néo-oliques de la perception olfactive et l'examen des notations sensorielles – les notations olfactives sont rares – que contiennent les récits des grands voyageurs. Le lecteur est ensuite conduit vers des lieux de l'Asie où s'actualise «la propension naturelle des odeurs à délimiter des lieux et à qualifier sans cesse des espaces» : c'est Pondichéry, où s'expriment olfactivement les rites et le labeur des hommes ; l'Eurasie, où les odeurs se font messagères du temps festif ; le Japon, où l'on «écoute» l'encens. Vient ensuite l'évocation des odeurs d'usines et de leur évolution parallèle aux mutations industrielles, de la usine à gaz du XIX^e siècle aux élevages intensifs et aux usines des industries agro-alimentaires. Enfin l'enquête s'oriente vers les odeurs de la ville, de celles du quartier de la Huchette, dans «le Paris qui sent», aux odeurs de Brest et de La Rochelle, en passant par une brillante évocation de Séville et de son «histoire chargée d'odeurs».

Il n'est pas certain que les géographes sauront un jour dresser la carte exhaustive de cet espace fluide et impalpable des «odeurs» dont quelques fragments nous sont dévoilés. Cependant, le lecteur trouvera dans ces textes ample matière à réfléchir sur la signification anthropologique des signaux odorants. Il apprendra, s'il ne le sait déjà, que l'on ne saurait réduire le monde des odeurs à l'opposition caricaturale du bon et du mauvais qui nous est pourtant familière. Il comprendra qu'il y a du sens, beaucoup de sens, à appréhender l'espace où vivent les hommes par cette sensorialité qui associe si étroitement le connu et le ressenti. Il s'étonnera qu'il y ait si peu de termes pour désigner les odeurs elles-mêmes

POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-55-42-84-00
<http://www.pourlascience.com>

POUR LA SCIENCE Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Hervé This (Rédacteur en chef), Françoise Ciotti (Rédactrice en chef adjointe), Bénédicte Lecerq (Rédactrice en chef adjointe), Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot, Loïc Mangin (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction : Annie Tacquet, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Merviel et Christelle Dumas. Direction financière : Pierre Lecomte, assisté de Anne Gusdorf. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Camille Laforge. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Denise Busson, Frédéric Chevy, Paul Decaix, Anne Decourchelle, J. de Dolmau, Guy Hervé, Evelyn Host-Platret, Marie-Thérèse Landousy, Guillaume Lecointre, Valérie Martin-Rolland, Jacques Meunier, Claude Olivier, Guy Paulus, Laurence Tirt.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor: John Rennie. Board of editors: Michelle Press, Mark Alpert, Timothy Beardsley, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Alden Hays, Kristin Leuwyl, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher: Joachim Rosler. Chairman and Chief Executive Officer: John Hanley. Co-Chairman: Rolf Grisebach. President: Joachim Rosler. Vice-president: Francis Newburg.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 55 42 84 28.

Télex : LIBEL N 202978F.

Télécopieur : 01 43 25 18 29

Étranger : Kate Dobson, 415 Madison Avenue, New York, N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS

Guinette Grémion : 01 55 42 84 04.

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Henri Gibelin

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : Modulo - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, Québec H3A 2Z4

Suisse : Serolis - 5, rue des Chaudronniers - 15 Postale 3663 - CH 01211 Genève

Autres pays : Éditions Belin - B.P. 205, 75264 Paris Cedex 06.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris).

Nos lecteurs trouveront dans ce numéro un encart publicitaire Newsweek et, en pages 18A, 18B, 98A et 98B, des bulletins d'abonnement.

que l'on doit toujours nommer leurs sources probables. Enfin, il appréciera quelques beaux textes contraints par cette pauvreté du vocabulaire des qualités olfactives à évoquer et à convaincre par la seule force du style.

André HOLLEY

Sociologie

Jeune chercheur, souffrance identitaire et désarroi social

Isabelle Pourmir. Editions L'harmonie, 1998.

Ce livre d'Isabelle Pourmir est à la fois émouvant et irritant. Il est émouvant par son caractère autobiographique et par la souffrance qu'il évoque. Il est irritant pour les raisons discutées plus loin.

Les motivations de l'auteur sont louables : Pourmir veut faire percevoir les raisons pour lesquelles les chercheurs hors statut n'ont pas la vie facile dans les laboratoires publics de type CNRS, INSERM ou universitaire. Pourquoi les conditions de vie qui sont les leurs entraînent-elles parfois un mal-être aux conséquences dramatiques ? Pourquoi les critères d'excellence qui sont ceux de la recherche scientifique pratiquée dans les laboratoires de haut niveau peuvent-ils avoir des effets néfastes sur le jeune chercheur hors statut qui n'a pas la possibilité de devenir chercheur statutaire ?

Pour répondre à ces interrogations, l'auteur se fonde sur sa propre expérience de recherche (sept années passées dans six laboratoires de biologie et de recherche biomédicale) et sur des entretiens que l'auteur qualifie elle-même de «semi-directifs» avec quatre directeurs de laboratoire et avec deux chercheurs non statutaires. Le lecteur a tout loisir, en près de 70 pages, de lire les questions et les réponses, ainsi que quelques commentaires du type : «Cette hésitation révèle un travail de réflexion authentique» suivie quatre lignes plus bas, de : «La prise de conscience de P.D. se précise».

La démarche de l'auteur présente bien des faiblesses. Tout d'abord, la lecture attentive des questions posées montre que les entretiens ont été très directifs, contrairement à ce qui était annoncé. D'autre part, l'expérience vécue de l'auteur et un nombre très limité de conversations avec des interlocuteurs

sélectionnés ne constitue pas une base suffisante pour tirer des conclusions générales, pour poser des diagnostics nuancés. I. Pourmir est d'ailleurs consciente de la faiblesse méthodologique qui entache son travail, mais elle se trouve une justification : sa démarche se distingue de la démarche «empirico-analytique» en ce sens que «il ne s'agit pas de mesurer, mais de comprendre». L'opposition affirmée entre «démarche empirico-analytique» et «compréhension» est révélatrice des raisons pour lesquelles I. Pourmir ne pouvait être heureuse dans des laboratoires de biologie !

Toutefois la vraie question qui se pose à la lecture de ce livre n'est pas ce que l'auteur a compris ou cru comprendre, mais ce que l'auteur nous aide à mieux comprendre, nous qui sommes biologistes, chimistes, physiciens, ingénieurs, économistes, sociologues... I. Pourmir semble ignorer que la recherche en biologie est particulièrement de nombreux égards et, notamment, en ce qui concerne la faiblesse des débouchés professionnels en dehors de la recherche publique. Des chercheurs ayant achevé leur thèse et qui souhaitent faire carrière dans la recherche publique effectuent souvent un stage post-doctoral, d'une ou deux années, hors de leur pays d'origine. Cette formation complémentaire à l'étranger n'est pas une garantie absolue de trouver, au retour, l'emploi dont on avait rêvé, mais elle offre parfois l'occasion de trouver cet emploi ailleurs. Ce séjour «au-delà des frontières» est presque toujours une expérience de vie très enrichissante. I. Pourmir n'évoque pas cet aspect pourtant si important de la vie du jeune chercheur. Si elle avait fait elle-même cette expérience, elle aurait certainement porté un regard différent sur la société scientifique.

En conclusion, cet ouvrage, s'il avait été plus foillé, aurait pu être une autobiographie intéressante. Malheureusement l'auteur a fait un autre choix et a voulu faire œuvre de socio-psychologue sans être attentive aux exigences d'une démarche de ce type. Les quelques paragraphes peints, mais peu originaux, consacrés à la politique de publication des laboratoires, au rôle des décideurs qui ne sont pas nécessairement les plus compétents et à la méritocratie scientifique ne suffisent pas pour compenser le jugement très mitigé que je porte sur l'ouvrage.

Jacques DESSÉ

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>