

D'AUTRES TERRES CÉLESTES • LA FUSÉE VASIMR • IMPUISSANCE ET VIAGRA

■ POUR LA

Pour la Science

SCIENCE

Janvier 2001

édition française de

www.pourlascience.com

SCIENTIFIC
AMERICAN

Réussites et échecs du clonage



Canada : \$ 8,75 / Belgique : 27 / FB / Suisse : 11,50

M 2687 - 070 - 28 00 F



BLOC-NOTES

de Didier Nordon

TRIBUNE DES LECTEURS

SCIENCE ET ÉCONOMIE

Voyage à Bast(i)a!

par Ivar Ekeland

POINT DE VUE

Les médecins face au clonage humain

par Laurent Degos



SCIENCE ET GASTRONOMIE

Curieux jaune

par Hervé This



PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

La constante de Planck

par Giulio Peruzzi



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

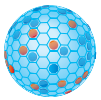
■ Un loir dort depuis 50 millions d'années
■ La fièvre de la vallée du Rift ■ Premières orbites

autour d'un trou noir ■ Colle de verre ■ Michel-Ange, maître
l'anatomie ■ Les tiques du python ■ Une banque de café arabica
■ 220 millions d'années, 23 mètres de long... ■ Prairies sous
dioxyde de carbone ■ Le mystère du fond diffus ■ Le puffin cendre
■ La mer en éprouvette ■ La vigne du Collège ■ Les termitières,
engrais naturels ■ Quand les poissons avaient des dents...
■ Nouvelles armes contre le paludisme

LOGIQUE ET CALCUL

Les nombres infinis vers la gauche

par Jean-Paul Delahave



VISIONS MATHÉMATIQUES

Hex : le jeu des hexagones

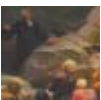
par Ian Stewart



IDÉES DE PHYSIQUE

Des ondes dans les artères

par Roland Lehoucq et Jean-Michel Courty



ART ET SCIENCE

Schiste et camisard

par Maurice Mattauer



ANALYSES DE LIVRES

■ Terre d'inventeurs, de Alain Frerejean ■ Généalogie
de la matière, de Michel Cassé ■ La théorie des jeux

de Gaël Giraud ■ Théorie des jeux et modélisation économique,
de David Krens.

Deux encarts d'abonnement entre les pages 18 et 19, un encart broché service lecteurs et une carte
d'abonnement entre les pages 98 et 99. Un encart parrainage pour les exemplaires destinés aux abonnés
en dépliant trois volets. Pour La Science vous recommande sur tous les numéros.



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

www.pourlascience.com

L'harmonie des cœurs d'atomes

par Ph. Chomaz, Y. Blumenfeld
et J.-A. Scarpaci

À la fois élastiques et rigides, les
noyaux des atomes sont des res-
sorts microscopiques : ils vibrent
et entrent en résonance.



Le clonage : état de l'art

par Jean-Paul Renard et Xavier Vignon

Objet de curiosité ou source d'inquiétude, le clo-
nage animal par reprogrammation d'une cellule adulte
est un outil que les biologistes maîtrisent de mieux
en mieux, mais le taux de réussite reste faible.

Le clonage de l'arche de Noé

par Robert Lanza, Betsy Dresser et Philip Damiani

Grâce au clonage, les biologistes disposent d'un moyen
d'éviter que les espèces animales menacées ne dis-
paraissent à tout jamais.

La fusée VASIMR

par Franklin Chang Díaz

Un nouveau type de fusées com-
bine les avantages des anciennes
forte poussée et rendement élevé



Les premières sociétés d'Égypte

par Barbara Barich
et Enrico Barich

Quand la sécheresse a chassé les premiers agriculteurs du Sahara, ils ont migré vers le Nil, berceau de la grande civilisation égyptienne.



56

La représentation de l'esprit chez l'enfant

par Anne-Marie Melot

Vers cinq ans, les enfants commencent à concevoir que chacun a sa propre représentation de la réalité physique et sociale.



57

Jeûner l'estomac plein

par Michel Gauthier-Clerc,
Yvon Le Maho et Yves Handrich

Le manchot royal conserve de la nourriture dans son estomac pendant l'incubation de l'œuf pour pouvoir nourrir le poussin à l'éclosion.

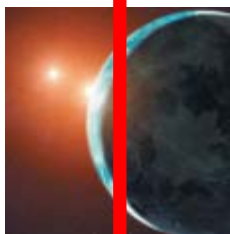


74

À la recherche d'autres terres

par Laurance Doyle, Hans-Jörg
Deeg et Timothy Brown

Les astronomes ont découvert des dizaines de planètes en dehors de notre Système solaire, mais ils n'ont pas réussi à capturer de sœur jumelle de la Terre... pour l'instant.



75

Les circuits du sexe

par Irwin Goldstein

Loin d'être indépendant, le pénis est sous l'influence de multiples centres nerveux qui le commandent.



86

La nouvelle Académie

La création d'une Académie des technologies repose les questions liées aux applications de la Science et à la responsabilité conjointe des scientifiques, des industriels et des décideurs politiques. Comme dans la maréchaussée composée de bons et de méchants, les rôles étaient autrefois partagés : le gentil scientifique faisait progresser les connaissances, le méchant industriel tirait profit de ces percées en faisant courir des risques à la Société. Le politique gérât ces intérêts conflictuels.

Le communiqué de presse annonçant la création de l'Académie, comporte des phrases soulignées afin que les journalistes comprennent bien la portée des propos. Figurent évidemment les grandes idées comme la nécessité de favoriser le transfert de technologie et la création d'entreprises innovantes et la volonté de repolitiser la science. Excellente, quoique un peu vague. L'Académie des technologies pourrait aussi enseigner au politique le statut de la connaissance.

La création d'entreprises innovantes n'est pas encouragée (litote) par les peurs liées à l'ignorance. Imaginons la position du jeune ingénieur qui a inventé un nouvel appareil : peut-il le commercialiser dans une nouvelle entreprise avant de s'être assuré qu'il est absolument inoffensif ? Le principe de précaution aurait interdit à Prométhée de donner le feu aux hommes, à Pasteur de vacciner Joseph Meister, aux chirurgiens de tenter des greffes.

Il n'y a plus de méchants et de bons, il y a des inquiets. Le politique doit prendre des décisions en fonction de son évaluation de ce que le scientifique sait. Et le scientifique ne parlera avec franchise que si le politique accepte que sa culture est incomplète. En sciences, et tout particulièrement en Sciences de la vie, une question n'amène pas une réponse, mais une chaîne d'autres interrogations (voir *Le clonage : état de l'art*, page 40). L'opinion publique apprend aujourd'hui à accepter les incertitudes multiples.

Si l'homme politique accepte ces indéterminations, sa représentation mentale du savoir scientifique en sera améliorée. Lors de son développement, on sait que c'est vers l'âge de cinq ans (voir *La représentation de l'esprit chez l'enfant*, page 66) que l'enfant sait ce que les autres savent. La connaissance du savoir des autres, et la représentation mentale que l'on s'en fait, sont des étapes importantes de la culture.

Philippe BOULANGER



BLOC-NOTES

DIDIER NORDON

La soustraction divise

La soustraction étant complémentaire de l'addition, ces deux opérations reviennent au même. Recourir à l'une plutôt qu'à l'autre est une question de goût. Voici un exemple. Imaginons une soirée. Tout en s'activant aux préparatifs, les hôtes comptent le nombre d'invités. Ils procèdent par addition, en s'y perdant un peu, bien sûr : il y aura les Untel avec leurs deux enfants, plus les Untel avec un enfant, plus Untel, etc. Ils trouveraient exactement le même résultat en partant du nombre total d'hommes vivants sur terre, et en en soustrayant le nombre de gens qui ne sont pas invités à la soirée.

Ce qui précède n'est pas qu'une plaisanterie. Dans certaines affaires criminelles, on a vu la justice agir de la sorte, ou presque, lorsqu'elle est incapable de trouver l'assassin, elle s'est résolue à faire subir systématiquement la recherche des empreintes génétiques à toute une population. Supposons que tous les tests soient négatifs et qu'il reste un seul individu non testé : c'est sûrement lui le coupable, mettons vite la main dessus.

Les techniques puissantes, comme les opérations élémentaires, sont utilisables de façon saugrenue.

Le temps de la nouveauté

Le progrès technique prouve que les hommes ne sont pas paresseux. Non seulement les inventeurs ennevrent sacrement loisirs et santé pour quelque perfectionnement, mais la masse suit. Car une technique nouvelle ne peut se répandre que si les gens sont prêts à faire l'effort de s'initier. S'ils étaient paresseux, avant de s'astreindre à acquérir tant et tant de nouveaux savoir-faire, ils se demanderaient si tous en valent la peine. Pareille attitude ne serait peut-être pas plus mauvaise, d'ailleurs.



Contrairement aux dires des publicités, une technique nouvelle ne sert pas tant à faire gagner du temps qu'à en faire perdre : avant que l'initiation, avec ses cafouillages et ses énervements, soit rentabilisée, une nouvelle technique surgira et, à son tour, exigera une familiarisation plus ou moins longue et pénible.

Cela dit, perdre son temps tout en se croyant en train de préparer un avenir meilleur est un des exercices favoris de l'humanité. De fait, c'est une excellente façon de ne pas souffrir de la vacuité du présent, de ne même pas la percevoir. Alors, vive le progrès technique!

La double mort du poète

Mort d'un écrivain. La presse, décrivant son enterrement à grand renfort de clichés, énumère les personnalités « venues rendre un dernier hommage au disparu ». Pauvre défunt, le cliché, passe encore! La presse y a droit. Ce qui est terrible, c'est la vérité qu'il exprime. Dernier hommage. Fini. Après, l'écrivain n'en aura plus. À quoi bon tant d'efforts de sa part pour éviter les clichés, justement, et nourrir son œuvre d'images hardies, de pensées puissantes, d'intrigues originales? Évanouie l'espoir que son enterrement marque le premier jour de sa gloire immortelle. Nouveau Virgile? Nouveau Shakespeare? Eux n'ont pas encore connu leur dernier hommage. Illusion! La presse, hélas, n'est jamais plus crédule que quand elle recourt aux clichés éculés.

Le plagiat : thérapie sociale

J'ai hais comme la mort l'état de plagiaire. Écrivait Musset, qui ne passe pourtant pas pour avoir été très délicat en la matière. Son aveu révèle le problème posé par les plagiaires. La situation dans laquelle ils se mettent ne peut que les faire souffrir. Non parce qu'ils jouissent d'un bien dérobé (cela, ils s'en accommoderaient), mais parce qu'ils reçoivent des compliments qu'ils savent immérités. Ce drame-là leur est propre. La violence avec laquelle, en leur for intérieur, ils ressentent leur insuffisance est d'autant plus dévastatrice qu'ils se croient plus grands. Pourquoi n'avouent-ils pas la vérité, mettant fin au supplice d'être félicités pour des qualités qu'ils n'ont pas?

C'est que l'aveu serait pire. Perdre la face d'abord. Mais, surtout, se retrouver seuls, sans personne pour les solliciter. Ce qu'ils fuient avant tout, c'est le vide. À l'époque de Musset, être reçu dans les salons ; aujourd'hui, pas ser à la télévision : en toutes époques, fréquente



es académies, cela occupe, cela distrait. Le mobile des plagiaires n'est pas de voler des braves, c'est de ne pas rester seuls aux prises avec la vacuité du temps. La peur, ô Pascal, de s'ennuyer quand on est livré à soi-même voilà la source de bien des frissonneries.

La beauté, il l'a dans l'œil

Beaucoup de scientifiques, émerveillés par la beauté de leur discipline, s'en étonnent et lui attribuent une signification extrême : la preuve éclatante que leur discipline met le doigt sur des vérités profondes.

C'est l'étonnement de ces chercheurs qui est étonnant. Leur situation est en fait la plus banale qui soit. S'ils agissaient sans aucun souci de beauté, là, il y aurait de quoi s'étonner. Car le besoin de beauté est, pour ainsi dire, inhérent à l'homme. Quoi qu'il fasse, il y met de la beauté, s'il peut. Il y a gros à parier que même les bourreaux ont des critères esthétiques pour commenter une exécution.

Les conceptions de la beauté sont très personnelles. Là-dessus, l'ironie de Voltaire est comparable. « Demandez à un crapaud ce que c'est que la beauté. Il vous répondra que c'est sa femelle avec deux gros yeux ronds sortant de sa petite tête, une gueule large et plate, un ventre jaune, un dos brun. » (*Dictionnaire philosophique*, article « Beau, beauté »).

Trouver belle la démarche qu'il choisit est une nécessité psychologique impérieuse de l'être humain, pas une preuve que cette démarche atteigne à une vérité.



TRIBUNE DES LECTEURS

Le corail

Notre article « Le récif corallien de Tahiti » (voir *Pour la Science*, août 2000) m'amène à apporter les précisions suivantes :

Premièrement, les zooxanthelles sont de minuscules algues endosymbiotiques (intracellulaires). Diverses sources estiment qu'il peut y en avoir jusqu'à dix millions par centimètre cube de tissu : elles ne peuvent donc se trouver dans la cavité stomacale des coraux que de façon transitoire, lorsque ces derniers sont au plus mal et les expulsent de leurs tissus. Cette expulsion accompagne le grave phénomène du blanchiment des coraux attribué, en première approximation, aux températures excessives dues au réchauffement global en cours.

Deuxièmement, la partie volcanique d'un atoll s'enfonce effectivement, comme l'avait supposé Charles Darwin (aux îles Keeling, ou Cocos, dans l'océan Indien), car la croûte océanique qui le porte se refroidit (subsidence thermique) et parce qu'en plus, actuellement, le niveau général de l'océan s'élève (eustatisme) ; mais le récif ne se soulève pas naturellement, il grandit vers le haut et vers l'intérieur, car c'est tout ce qu'il peut faire, accroissant la taille du lagon (récif frangeant, récif barrière). En effet, du côté de la haute mer (tombant, récifal), où il se protège avec ses formes sphériques les plus résistantes, sa croissance horizontale est bloquée par les dégâts de la houle, des tempêtes et des cyclones : il ne s'écarte donc pas de la côte du cône volcanique.

Les coupes tournées (avec une très forte exagération verticale) le montrent parfaitement s'écartant entre les pointes désignées, ou non, par les flèches obliques, ne change pas dans les trois figures : 3,2 millimètres. En fait, faute de possibilité d'expansion horizontale, la taille de l'anneau initial est imposée, d'une part par la profondeur maximale où les coraux peuvent vivre (100 mètres maximum), d'autre part, par la pente du cône volcanique, en général très faible.

Enfin, les récifs qui se soulèvent existent mais sont rares, et il en meurent. Ils deviennent alors des îles calcaires criblées de grottes à bordure typique en marches d'escalier. Le meilleur exemple est celui des îles Loyauté, près de la Nouvelle-Calédonie ; d'autres sont connus au Nord d'Haïti ou à la pointe Est de Cuba. Tous sont associés à des phénomènes tectoniques : aux Loyauté, il s'agit d'un grand bombement, dit ride des Loyauté ; à Cuba et à Haïti, il s'agit de l'influence d'un grand décrochement compressif Est-Ouest.

Tous les récifs n'ont donc pas la chance de pouvoir grandir indéfiniment, même s'ils sont épargnés par la tectonique. Si leur vitesse de croissance verticale ne parvient pas à compenser l'effet combiné de la subsidence et de

l'élévation du niveau marin, ils meurent privés de lumière et de l'apport nutritif de leurs zooxanthelles qui ne « fonctionnent » plus (les sédimentologues disent qu'ils ne parviennent pas à combler l'espace disponible). Alors l'ensemble de l'atoll se noie, comme on en connaît de très nombreux exemples dans l'océan Pacifique, où les plus vieux ont au moins 115 millions d'années : dans le monde, leur nombre atteint environ 10 000.

C'est pour cela que la démarche de Guy Cabioch et de ses collègues est particulièrement intéressante, car 18 millions de kilomètres carrés d'espaces récifaux sont concernés. Leurs résultats recoupent parfaitement ce que l'on savait des édifices coralliens les mieux connus, notamment ceux où ont eu lieu des essais nucléaires : Bikini, Eniwetok, Mururoa.

Jean-Marie VILA, Toulouse

De l'algorithme

En lisant l'excellent article de Gilles Dowek « L'infini et l'univers des algorithmes » (voir *Pour la Science*, décembre 2000), je constate une fois de plus que les auteurs qui définissent les algorithmes oublient souvent de préciser qu'une procédure ne mérite d'être considérée comme un algorithme que si elle est rigoureusement déterministe et, lorsqu'elle fournit un résultat, que si celui-ci est unique. C'est ainsi qu'aucune instruction ne doit faire appel à un processus aléatoire comme : « Lancer alors un dé et ajouter le chiffre obtenu. » Je suppose que, pour ces auteurs, cette restriction est évidente, mais elle ne l'est pas pour tout le monde scientifique de haut niveau de mon entourage ne l'admettait pas.

Parfois même, ces auteurs parlent de logiciel, alors que ce terme est réservé aux ordinateurs réels et qu'ils devraient dire qu'un algorithme est équivalent à une « machine de Turing ». Et ce parce que les ordinateurs sont essentiellement interactifs, sans quoi ils auraient peu d'intérêt, alors qu'une machine de Turing est rigoureusement non interactive (elle n'a ni clavier ni même de boutons « marche/arrêt » ; si elle en avait un, la démonstration du théorème de l'arrêt s'effondrerait). Cette restriction correspond à la définition d'une « application » en mathématiques : l'élément « cible » doit être unique et déterminé, alors qu'il peut y avoir plusieurs « sources » pour une seule cible.

En revanche, sur un ordinateur, un opérateur indiscipliné peut saisir sur le clavier, lors d'un arrêt au cours de l'exécution d'un logiciel, l'heure qui apparaît sur sa montre ou le résultat du lancement d'un dé, au lieu de la donnée qui figure sur son livre de consignes.

C'est en raison de cette interactivité que les ordinateurs ne sont des machines algorithmiques

que par intermittence, et qu'ils ne satisfont pas au théorème de l'arrêt. C'est pour la même raison que notre cerveau, relié en permanence à l'univers extérieur, ne peut pas non plus avoir un fonctionnement strictement algorithmique, sans qu'il soit nécessaire d'invoquer l'indétermination quantique au niveau des synapses, comme a cru devoir le faire le mathématicien Penrose.

J.-P. SCHWAB

Deux absurdes

Dans l'article « Les mathématiques, science de l'infini » (voir *Pour la Science*, décembre 2000), un encadré détaille un exemple fameux de raisonnement par l'absurde : celui qui établit l'irrationalité du nombre « racine carrée de deux ».

Dans le même numéro, l'article intitulé « L'infini, pierre de touche des constructivistes » explique que les mathématiciens constructivistes rejettent la loi du tiers exclu, « sans laquelle il n'est évidemment pas de preuve par l'absurde ». Doit-on en conclure que les constructivistes rejettent la démonstration de l'irrationalité de la « racine carrée de deux » ? Non !

La difficulté vient de ce que les mathématiciens confondent souvent sous la même appellation de « raisonnement par l'absurde » deux types bien distincts de raisonnement. Parlons d'abord du « faux » raisonnement par l'absurde : il s'agit, pour établir la négation d'une certaine proposition P , de supposer P et d'en tirer une contradiction. On peut considérer que c'est la définition même de la négation qui est mise en œuvre dans ce raisonnement, auquel les constructivistes ne voient en général aucune objection. Ils ne mettent donc pas en doute que le nombre « racine carrée de deux » est irrationnel, ni même que l'ensemble des nombres réels est indénombrable.

Le « vrai » raisonnement par l'absurde, celui que les constructivistes rejettent et qui est équivalent au principe du tiers exclu, consiste à établir une proposition Pen montrant la négation de la négation de P . Sans lui, on ne peut plus considérer qu'une proposition donnée est automatiquement la négation d'une autre. Le « vrai » raisonnement par l'absurde est donc plus puissant que le « faux ». Il est d'ailleurs assez rarement indispensable dans les mathématiques élémentaires.

Pierre AGERON, Université de Caen

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



Voyage à Bast(i)a!

VAR EKELAND

Il est difficile de comprendre la stratégie économique qui a pour conséquence l'exaspération due au manque de ponctualité des vols d'Air France.

Le lundi 13 novembre, je me suis rendu à Orly pour prendre le vol Air France de 9 h 25 pour Bastia. L'avion n'a décollé qu'à 11 h 05.

Soixante minutes après l'heure d'arrivée prévue. Mes compagnons d'infortune m'ont assuré que ce retard n'avait rien d'inhabituel ; je sortais d'ailleurs d'une expérience similaire sur Paris-Clermont-Ferrand, toujours avec Air France. De fort méchante humeur – j'avais dû me lever à 7 heures pour me présenter à temps à l'embarquement –, j'ai tenté d'apaiser ma colère en réfléchissant sur les raisons qui faisaient que j'allais perdre ma journée dans des avions et des aéroports, pour un voyage qui devenait sans objet à mesure que le temps passait.

La première raison qui s'est offerte à moi, alors que le pilote assurait pour la quatrième fois aux passagers sanglés dans la carlingue que le départ était imminent, a été la théorie classique du monopole. C'est le résultat le plus vénérable et le mieux assuré de la modélisation mathématique en économie : lorsqu'il y a un seul vendeur pour un produit, le prix que paieront les consommateurs est plus élevé que lorsqu'il y a plusieurs vendeurs en concurrence.

De fait, Air France est la seule compagnie à desservir Paris-Bastia. Toutefois, la théorie du monopole ne collait pas exactement à la situation présente. Je ne me plaignais pas que le prix du billet soit trop élevé, mais, du fait que la compagnie se permette une heure et demie de retard pour un vol d'une heure et demie. D'ailleurs, Air France a perdu la situation de monopole qu'elle exerçait sur les lignes intérieures (via Air Inter) et l'on peut penser que le prix pratiqué n'est pas trop loin d'un prix concurrentiel, sinon une autre compagnie ouvrirait une ligne concurrente. Ce n'était pas un problème de prix, mais un problème de qualité.

L'avion décolle enfin et, en vol, je me dis que le problème est que la qualité du bien vendu, à savoir Paris-Bastia-Paris, ne peut être contrôlée *a priori*. Dans le jargon des économistes, il s'agit d'un bien d'expérience. Si j'achète un œuf, je sais à peu près à quoi m'attendre : il peut

être plus ou moins frais, mais il est rare qu'il ne soit pas mangeable. En revanche, si j'achète un Paris-Bastia décollant d'Orly à 9 h 25, je n'ai aucun moyen de savoir s'il partira avec deux ou trois heures de retard. En d'autres termes, la qualité du produit ne peut être constatée au moment de l'achat, ce qui fait que la théorie classique du monopole ne s'applique pas : si j'avais su que l'avion partirait avec un tel retard, je n'aurais pas pris le billet. Comme la compagnie ne me remboursera pas pour autant, cela permet au monopoleur une nouvelle stratégie : vendre à un prix concurrentiel un produit de qualité prétendument concurrentielle, mais en réalité de qualité inférieure, sachant que le consommateur est incapable de discerner celle-ci à l'achat.

Le puzzle prend forme. Air France essaie de détourner le cours de mes réflexions avec un nescare tiède et un croissant gluant, mais je résiste sans grande difficulté. Le talon d'Achille de la stratégie pratiquée est que le client apprend : après un certain nombre d'expériences, je finirai bien par comprendre la réalité du service offert. Peut-être n'aurai-je pas le choix (on ne peut pas aller à Bastia en train), mais je trouverai que c'est cher payé. Le monopoleur peut donc pratiquer cette stratégie sur la clientèle occasionnelle, mais elle lui aliénera les voyageurs fréquents, spécialement ceux d'entre eux pour lesquels le temps compte, c'est-à-dire les hommes d'affaires.

Qu'à cela ne tienne, on va leur donner une compensation financière : et voilà pourquoi nous avons cette gamme de réductions pour ceux qui prennent l'avion souvent, des abonnements jusqu'à la carte *Fréquence Plus*. Cela revient à faire payer à cette clientèle-là, et à celle-là seulement, le service à son juste prix ; les autres continuant à payer à un prix élevé pour un service de mauvaise qualité.

Je suis plutôt content d'avoir compris, mais patatras ! Voilà que mon puzzle intellectuel tombe par terre. Si mon raisonnement était juste, il devrait s'appliquer au seul monopole de trans-

port qui subsiste encore, la SNCF. Mais celle-ci a une réputation opposée : les trains sont à l'heure, c'est même une des fiertés nationales que nous partageons à regret avec l'Helvétie. Pourquoi les trains sont-ils à l'heure alors que les avions sont en retard ? Pourquoi la SNCF ne joue-t-elle pas la même stratégie qu'Air France ?

Le pilote annonce la descente sur Bastia. La Corse se profile à travers les nuages, et la solution pointée dans ma tête. La SNCF ne pratique pas la même stratégie qu'Air France, car elle n'a pas les mêmes contraintes. Air France ne peut guère jouer sur les prix, en raison de la concurrence, mais se rattrape sur la qualité. En revanche, quels que soient les prix que pratique la SNCF, aucun autre opérateur ne viendra la concurrencer sur le réseau intérieur. La SNCF ressemble donc bien davantage à un monopoleur classique, qui choisit le niveau de production et les prix qui maximiseront ses revenus. La production de la SNCF, c'est le transport lui-même, certes, mais aussi sa qualité : respecter les horaires ne va pas de soi, mais nécessite des dispositifs, du personnel et des modes de gestion appropriés et coûteux. On peut donc s'attendre à ce que la SNCF combine prix et qualité de la manière la plus avantageuse pour elle, en terme de revenus d'investissement et d'embauche de personnel, et il semble bien que la stratégie optimale passe par une qualité élevée. Voilà pourquoi les trains sont à l'heure, – mais à un prix sans doute très élevé ! Voilà sans doute aussi pourquoi la SNCF s'intéresse davantage au trafic voyageur qu'au fret.

La boucle est bouclée. Nous avons atterri à Bastia. Le pilote espère que nous avons fait un bon voyage et souhaite nous revoir bientôt sur les lignes d'Air France. En ce qui me concerne, cela ne va pas tarder ; vu l'heure qu'il est, je n'ai plus rien à faire à Bastia et je vais donc rentrer à Paris par le même avion. Le seul bénéfice que j'aurai tiré de cette journée est que cette chronique est prête.



Les médecins face au clonage humain

LAURENT DEGOS

Le clonage pour la fabrication de tissus de remplacement serait un outil précieux, mais il faut mettre des garde-fous au clonage reproductif

Les médecins et les biologistes doivent respecter la loi, mais l'histoire nous apprend que le médecin convaincu de l'utilité d'un traitement interdit passe souvent entre les règles et les lois. Nombreux sont les exemples, telle la mise en place des traitements par greffe d'organe.

En 1947, la direction de l'Hôpital Peter Bent Brigham de Boston avait répondu négativement à David Hume, qui avait demandé l'autorisation de faire une greffe de rein afin de traiter une jeune femme dans le coma. Elle avait une septicémie (des microbes dans le sang) qui avait provoqué une insuffisance rénale. Dans le coma, elle allait mourir. Une nuit, David Hume préleva un rein sur une personne morte ; il greffa à la jeune femme le rein au pli du coude, raccordant les vaisseaux du rein à ceux de la malade et laissant l'uretère libre. L'urine se mit à couler, la jeune femme sortit de son coma. Le rein ne fonctionna que quelques jours, mais ce fut suffisant pour passer le cap de l'insuffisance rénale aiguë. La jeune femme guérit. D. Hume avait-il eu tort de ne pas obéir aux ordres de ses supérieurs ?

Bon nombre de greffes ont été effectuées ensuite, en prenant le rein à un membre de la famille, sain et volontaire. En ce temps, la loi interdisait pourtant de mutiler une personne saine. La mutilation n'était acceptée que pour un bénéfice

personnel, c'est-à-dire pour traiter une maladie (amputation d'une jambe atteinte de gangrène, par exemple). Les lois, l'encyclique papale condamnaient la mutilation d'un être sain. Cependant, les médecins passèrent outre et multiplièrent les transplantations.

Plus grave aux yeux de la loi est l'acte d'homicide volontaire. En 1963, Guy Alexandre, en Belgique, puis en 1964 Jean Hamburger et bien d'autres ensuite, ont prélevé les reins de personnes dont le cœur battait encore, mais dont le cerveau était irrémédiablement endommagé. Ils avaient considéré que la mort était la mort cérébrale et non la mort cardiaque. Or, seule la mort cardiaque était reconnue par la loi, et il fallut attendre le 24 avril 1968 pour qu'une circulaire ministérielle parle de mort cérébrale. Pendant cinq ans, médecins et chirurgiens pratiquèrent des « homicides volontaires ».

Le médecin ne se considère pas coupable face à la loi s'il apporte un bénéfice à autrui. Il a fait évoluer un concept essentiel, celui de la mort de l'homme. En effet, sans ce changement de définition de la mort, on n'aurait pu effectuer de greffe de cœur ou de foie, car après l'arrêt de la circulation, l'organe meurt. Au Japon, où la mort est toujours définie par l'arrêt du cœur, on ne peut pratiquer de greffe de cœur ni de foie.

Contrairement aux apparences, nous ne sommes pas très éloignés du sujet : doit-on accepter, refuser ou repousser le clonage humain ? Le corps médical est-il sur cette question en accord ou en opposition avec la loi ? Comment peut-on éviter les dérives même si, comme pour les greffes, elles auraient des conséquences positives pour la santé humaine ?

Le clonage reproductif humain est aujourd'hui condamné. Imaginons qu'un couple, éploré par la mort d'un enfant, demande à ce qu'un clone de ce dernier soit « créé », permettant ainsi de retrouver l'enfant perdu. Dans ce cas, le père et la mère sont bien les porteurs initiaux du patrimoine génétique de l'enfant et la

mère porteuse est la mère biologique. Quel mal y aurait-il à une telle pratique ?

En réalité, l'acceptation scientifique, juridique et sociale d'un tel projet, dont la finalité serait de consoler les parents de la perte d'un enfant, repose sur une double tromperie. Tromperie pour la famille, car le clone n'est pas un être copie conforme de l'enfant original. Tromperie pour l'enfant, créé non pas dans l'amour qu'il mériterait pour lui-même mais en souvenir de l'amour porté à un autre. Les médecins et les psychologues connaissent des cas où, après la perte d'un enfant, un couple s'empresse d'avoir un enfant de « remplacement ». Ce dernier a souvent des difficultés pour trouver sa place, celle qu'il mérite pour lui-même. Son aspect physique, différent, l'y aide. Un clone hypothétique n'aurait pas cette chance : ayant le même physique, il serait condamné à rester enfermé dans le rôle de remplacement qui lui a été assigné. Dès lors, pourquoi les médecins s'intéresseraient-ils aux clones humains puisqu'ils condamnent la finalité de reproduire un être humain-copie conforme ?

Aujourd'hui, les médecins ne savent pas soigner toutes les maladies, notamment celles qui résultent du vieillissement – on parle de dégénérescence – des cellules, telles que les neurones, ni les maladies graves, telles les insuffisances cardiaques ou hépatiques. Le seul traitement est alors la greffe, mais on ne dispose pas toujours de donneur compatible avec la personne malade. Or les cellules embryonnaires ou les cellules souches de l'organisme, celles qui ont la possibilité de se « transformer » en n'importe quel type de cellules, ouvrent un champ de recherche encore peu exploré, mais prometteur.

On ne sait pas encore cloner des organes, mais si de tels organes étaient disponibles, ils remplaceraient sans la moindre hésitation les greffons prélevés sur une personne morte ou vivante. Un organe de substitution identique à celui du receveur permettrait d'éviter toutes les



difficultés posées par la diversité des êtres vivants, responsable des réactions de rejet ; la « fabrication » de tels organes fait certainement partie des objectifs médicaux.

Le clone représente la copie physique de soi : il est donc source de connaissance ou d'organes de réparation de l'organisme. Comment obtient-on un clone ? Il est extrêmement aisé, en laboratoire, de croiser deux animaux de la même portée et de sexe différent. En répétant ce croisement (frère – sœur), sur plus de trente générations, on obtient une « lignée pure », c'est-à-dire un ensemble d'animaux génétiquement semblables, et les greffes, au sein de cette lignée, sont bien tolérées. En dehors de folles eugéniques et de la propagande pour une race pure, l'idée de proposer chez l'homme de tels croisements consanguins successifs est à la fois prohibée et condamnée. Une deuxième méthode de clonage est employée chez l'animal : après fécondation *in vitro*, on cultive l'embryon et on sépare ses cellules avant le stade de 16 cellules. Chacune des cellules ainsi récupérées (jusqu'à huit cellules) peut être réimplantée séparément chez une femelle donnant naissance à un organisme entier.

Ce cas de figure peut intéresser le médecin. Prenons le cas où une maladie familiale est connue. On pourrait alors pratiquer une fécondation *in vitro* et récupérer, après culture, quelques cellules de l'embryon pour les étudier. Le diagnostic, effectué sur une seule cellule grâce aux outils de la biologie moléculaire, indiquerait la présence ou non de la maladie redoutée. Ne seraient réimplantés que des embryons indemnes. Cette voie de « sélection » embryonnaire était interdite en France, hormis quelques cas particuliers, elle implique la culture et la manipulation de l'embryon, pratiques très encadrées. Cependant, cette méthode est autorisée depuis peu, aux États-Unis et a été récemment utilisée à l'Hôpital Necker.

Une troisième méthode, celle qui a été employée pour créer Dolly, consiste à remplacer le noyau d'un ovocyte par celui d'une cellule provenant d'un autre animal de la même espèce. En effet, c'est dans le noyau qu'est contenue toute l'information génétique ; l'embryon ainsi formé est le sosie de l'individu dont est issu le noyau.

Cette technique ouvre la voie à la reproduction, sous la forme d'une copie conforme, de l'être qui a donné le noyau. Le clonage reproductif chez l'homme est rejeté par les conseils éthiques. En revanche, si les cellules de ce même embryon, formé à partir du noyau donneur, étaient cultivées *in vitro*, elles auraient la capacité de donner différents



types de tissus (muscles, nerfs, peau, en fait, n'importe quel tissu). On produit en fait, n'importe quel tissu). On produit un embryon, mais il ne serait pas réimplanté chez une femme et ne donnerait que des cellules, identiques à celles du donneur de noyau. Ces cellules seraient strictement identiques, mais elles seraient « neuves » et pourraient remplacer les cellules vieillissantes et dégénérées d'un organisme sans risque de rejet, car elles auraient le même patrimoine génétique que le donneur du noyau. Des cellules dérivées d'un clone, produisant des tissus de remplacement, seraient de précieux outils thérapeutiques. Ces deux aspects du clonage, celui du diagnostic prénatal en cas de fécondation *in vitro*, et celui du traitement des maladies dégénératives par des cellules ou des tissus de remplacement, font que le médecin prête l'oreille lorsque les discussions portent sur le clonage humain. Dans tous les cas, il rejette catégoriquement l'idée de clonage reproductif, c'est-à-dire du clonage qui donnerait naissance à un sosie.

Moutefois, le débat ne s'arrête pas là. Au cœur de la discussion, se trouve l'embryon : quel est son statut ? La pression des patients qui attendent une amélioration de leur état, et celle des médecins qui veulent toujours aider les malades en détresse, n'imposent-elles pas une direction privilégiée au débat ? Déjà, l'ordonnance constate la diversité des règles interdisant ou autorisant les recherches sur les embryons surnuméraires non réimplantés après fécondation *in vitro* ; c'est dire que les avis sur le statut de l'embryon et sur la part de dignité et de respect qu'on devrait lui attribuer sont encore très partagés.

Ainsi, le statut de l'embryon clone change selon que l'on considère que son unique finalité est de devenir un être

humain, ou qu'il est possible de passer par cette étape éphémère du clone, uniquement pour élaborer des traitements.

Toutes les craintes seront sans doute levées si l'existence de cellules indifférenciées chez l'adulte est confirmée. Si des cellules pluripotentes existent réellement dans l'organisme, les clones non reproductifs n'auront plus à être produits. Il suffira de prendre des cellules souches pluripotentes chez un adulte ayant une dégénérescence nerveuse pour les cultiver et de les faire se différencier en cellules nerveuses, lesquelles seront implantées dans le cerveau malade.

Alors, si le clonage est encadré par la loi, par les responsables éthiques ou par d'autres instances, mais s'il donne un avantage important pour guérir des maladies dégénératives, il est certain que les médecins chercheront à mettre en place des traitements par ce biais. Pour eux, aucun interdit ne vaut, face à la possibilité de sauver une vie. À charge ensuite aux hommes de loi et aux penseurs de l'éthique de trouver les arguments pour expliquer leurs actes et placer les limites. On est déjà passé, récemment, de l'interdiction à la permission de faire des recherches sur l'embryon, dans un contexte très surveillé.

Acceptera-t-on la constitution d'embryons humains, dans le cadre du clonage, en excluant toute finalité reproductive ? Ce serait là, comme dans le changement de la définition de la mort, la preuve que l'utilité scientifique et médicale est la valeur suprême en matière de droit. Sauver et aider une personne en danger serait notre premier commandement. N'y a-t-il pas de limites ? Cette fois, les hommes de loi auront, je pense, à cœur de proposer des lois avant que l'acte médical ne soit effectif plutôt que subir le diktat du fait accompli. Ils ont encore le temps, car le premier clone humain (à finalité reproductive ou thérapeutique) n'est pas pour demain. Quant à la question de savoir si l'on pratiquera un jour le clonage à visée reproductive, la réponse ne sera ni de la compétence des médecins ni de celle des hommes de loi ; elle dépendra surtout de l'idée que l'homme se fait de l'homme.

Laurent DEGOS dirige le Service d'hématologie de l'Hôpital Saint-Louis, à Paris.

Ce texte est extrait du chapitre signé par l'auteur dans *Les progrès de la peur, la Peur du progrès*, sous la direction de Nayla Farouki, à paraître en février 2001. Éditions Le Pommier.



Curieux jaune

HERVE THIS

Les structures insoupçonnées du jaune d'œuf

Devant vous, un œuf, entier et cru dans sa coquille. Où est le jaune ? Sans doute sur un axe vertical pour des raisons de symétrie. Mais les physiciens. Cependant, deux possibilités demeurent : le jaune pourrait être dans la partie supérieure, au centre ou dans la partie inférieure. Comment le savoir ? Une expérience simple consiste à couvrir un jaune par plusieurs blancs d'œuf, dans un verre étroit et haut. On voit le jaune flotter et l'on déduit qu'il est de même dans un œuf entier.

Les membranes qui entourent le jaune et le lient au reste de l'œuf évitent-elles l'ascension du jaune, dans un œuf entier dans sa coquille ? Il existe plusieurs façons de montrer que non. Par exemple, coupez l'œuf debout, et vous verrez, dans l'œuf dur formé, le jaune logé dans la partie qui était la plus élevée. Vous craignez que la coagulation n'ait perturbé l'arrangement interne de l'œuf ? Placez un œuf entier, frais, avec sa coquille, dans du vinaigre : après deux jours environ la coquille ayant été dissoute par le vinaigre, vous verrez le jaune flotter dans le blanc (l'œuf conserve sa forme parce qu'il est limité par des membranes et parce que les couches externes auront coagulé sous l'action du vinaigre).

Ou bien, plus simple encore, décalotez l'œuf frais, et regardez où se trouve le jaune.

A ces procédés de cuisine, on peut en ajouter de plus élaborés. Si la radiographie donne de mauvais résultats (parce que la coquille est un matériau opaque aux rayons X), l'échographie procure des images étonnantes. La figure a été obtenue par immersion d'une sonde à ultrasons dans un œuf décalotté : le jaune apparaît composé de couches concentriques, analogues aux cernes d'un arbre.

Pourquoi cette structure que ne soupçonne aucun mangeur d'œuf à la coque ? Le jaune est une alternance de couches nommées «jaune profond» et «jaune clair», dont l'épaisseur est respectivement de deux millimètres, et de 0,25 à 0,4 millimètre. Ces couches sont respectivement produites par la poule pendant le jour et pendant la nuit : la différence entre les deux types de couches provient du rythme de l'alimentation ; pendant la nuit, les pigments jaunes sont produits en concentration plus faible que pendant le jour.

Si nous continuons l'exploration au microscope, nous voyons que les deux couches, jaune clair et jaune profond, ne sont pas homogènes, mais composées de granules, dispersés dans une phase continue, nommée le plasma. D'où des questions sur les rôles respectifs de ces constituants en cuisine.

À la Station INRA de Nantes, Marc Anton et ses collègues explorent cette composition en séparant les granules du plasma par centrifugation. On constate ainsi que le jaune est composé pour moitié d'eau, pour un tiers de lipides (dont du cholestérol) et pour 15 pour cent d'environ de protéines. Protéines et lipides sont souvent associés en particules qui se distinguent par leur densité : lipoprotéines de faible densité (LDL) dans le plasma ou lipoprotéines de haute densité (HDL) dans les granules.



Echographie d'un jaune d'œuf. Le jaune apparaît composé de couches concentriques.

Comment ces constituants du jaune d'œuf interviennent-ils, en cuisine ? La séparation des divers constituants permet de tester leurs propriétés. Et c'est ainsi que l'on vérifie que les LDL s'associent en un gel, quand on les chauffe à environ 70 degrés : ces structures composées de protéines, de lipides et, notamment, de cholestérol, seraient responsables de la prise en masse du jaune lors de la cuisson.

Et les mayonnaises, composées de gouttelettes d'huile dispersées dans l'eau (du jaune et du vinaigre) : sont-elles stabilisées, comme on l'a longtemps présumé, par les «lécithines» et autres

phospholipides du jaune ? Ou bien résultent-elles de l'action stabilisante des protéines ? M. Anton et ses collègues ont étudié cette question en cherchant d'abord si les propriétés émulsifiantes du jaune provenaient plutôt du plasma ou des granules. Comme les protéines ont une solubilité qui dépend de l'acidité, les biochimistes ont d'abord étudié leur solubilité selon le pH (qui mesure l'acidité) et selon la concentration en sel : les protéines du plasma sont complètement solubles, à tous pH et à toutes concentrations en sel, tandis que les protéines des granules ont des solubilités différentes, selon les conditions. Peu solubles à pH égal à 3 (celui d'une mayonnaise), elle ne le deviennent que partiellement à pH neutre, en milieu peu salé (l'ion sodium remplace l'ion calcium qui établit des ponts entre les protéines, de sorte que ces dernières sont libérées).

La solubilité des protéines n'est pas le fin mot de la confection des émulsions : celles-ci sont d'autant plus stables que le phénomène de crémage est réduit. Avec le plasma, le crémage est minimal à pH égal à 3, et la concentration en sel n'a pas d'effet en milieu acide, tandis que les émulsions obtenues à partir de granules sont sensibles à l'acidité et à la concentration en sel. Les émulsions obtenues à partir de jaune complet se comportent comme celles qui sont obtenues à partir de plasma.

Au total, les constituants du plasma sont principalement responsables de l'effet émulsifiant du jaune d'œuf complet et les protéines préviennent mieux le crémage que les phospholipides. Comment les protéines qui figurent dans les LDL du plasma agissent-elles ? Par des répulsions électrostatiques ? Ou par leur encombrement (répulsion «stérique») ? À pH égal à 3, les protéines sont électriquement chargées, et elles se repoussent, mais à pH égal à 7, c'est l'encombrement des protéines qui stabilise les gouttelettes ; il reste à comprendre comment.

Tout cela pour un banal jaune d'œuf.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 25 janvier 2001, avec la chronique Info Sciences de Marie Odile Monchicourt.

■ POUR LA SCIENCE

VOTRE ABONNEMENT 100 % NUMÉRIQUE

1 an au prix de 48 €

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

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



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

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



La constante de Planck

GIULIO PERUZZI

Il y a un siècle, Max Planck formulait l'hypothèse des quanta de lumière pour expliquer le rayonnement du corps noir et y introduisait la constante. C'est aujourd'hui l'une des quantités les plus utilisées dans les lois physiques.

Dans l'après-midi du 7 octobre 1900, les Planck vont prendre le thé chez les Rubens. Max Planck et son collègue, Heinrich Rubens, faisaient souvent compagnie à leur femme pour discuter des dernières mesures de Rubens concernant le rayonnement du corps noir (un corps noir absorbe parfaitement tous les rayonnements électromagnétiques), l'un des problèmes les plus épineux de l'époque. Le même soir, Planck trouve empiriquement la loi qui décrit le comportement du corps noir, observé par Rubens. Deux semaines plus tard,

Planck et Rubens présentent leurs travaux à l'Université de Berlin. Puis, le 14 décembre, à la Société allemande de physique, Planck expose l'hypothèse qui l'a conduit à cette loi : la quantification de l'énergie. Il explique que le rayonnement émis par un corps noir se comporte comme s'il était constitué de « paquets » d'énergie dont la valeur serait $E = h\nu$, où ν est la fréquence du rayonnement et h la constante connue aujourd'hui sous le nom de constante de Planck. Il l'avait alors estimée à $6,55 \times 10^{-34}$ Joule.seconde (sa valeur actuelle est de $6,63 \times 10^{-34}$ Joule.seconde).

Planck résout ainsi le problème du corps noir, posé par le physicien Gustav Kirchhoff en 1859. Kirchhoff avait étudié le comportement des corps en équilibre thermique avec le rayonnement qu'ils entourent. Le rayonnement thermique est l'énergie électromagnétique émise par tous les objets, à cause de l'oscillation continue et désordonnée des atomes qui les constituent. L'aptitude d'un corps à émettre et à absorber l'énergie électromagnétique est caractérisée par son pouvoir d'émission et par son coefficient d'absorption. Le premier est l'énergie émise par unité de surface, par unité



1. Les participants au congrès Sovay de 1927. Les partisans de la théorie électromagnétique et de la théorie atomique de la mécanique quantique s'y sont affrontés. Max Planck est le deuxième en partant de la gauche, au dernier rang.

le temps et par unité d'intervalle de fréquence voisine d'une fréquence ν donnée ; le second est la fraction de l'énergie incidente absorbée par le corps étudié dans cet intervalle de fréquence. Tous deux dépendent de la fréquence ν et de la température du corps, mais aussi de sa nature, en particulier de sa surface. La loi de Kirchhoff stipule que, dans le cas d'un corps en équilibre thermique avec le rayonnement qui l'entoure, le rapport entre son pouvoir d'émission et son coefficient d'absorption est une fonction universelle (la fonction de distribution), qui reste la même quel que soit le corps : elle ne dépend que de la fréquence ν et de la température du corps. Kirchhoff lance alors un défi intellectuel à la communauté scientifique : trouver l'expression de cette fonction de distribution. De nombreux physiciens s'y intéressent, mais sans résultat, à cause des difficultés techniques que posaient les expériences.

L'HYPOTHÈSE DES QUANTA

En octobre 1900, Planck propose une expression de la fonction de distribution de Kirchhoff, fondée sur les derniers résultats expérimentaux de Rubens. Cette loi de rayonnement de Planck, bien qu'elle n'explique rien, va révolutionner la physique. Le physicien se met alors à chercher une théorie pour justifier l'équation qu'il a conçue. Il reprend les résultats de Kirchhoff. Celui-ci avait introduit la notion de « corps noir idéal », un corps parfaitement absorbant, dont le coefficient d'absorption serait égal à 1, et le pouvoir d'émission à la fonction de distribution. Il avait montré que cette fonction est la même pour un corps noir et pour une telle cavité isolée à la même température : le rayonnement émis par un corps noir est donc identique à celui qui se trouverait en équilibre dans une telle cavité. Planck suppose que ce dernier interagit avec des oscillateurs microscopiques (dont il n'explique pas la nature), qui vibrent sur la surface des parois, absorbant et réémettant de l'énergie indépendamment du matériau : on sait aujourd'hui que les atomes des parois se comportent ainsi, mais à cette époque, Planck ne croit pas à leur existence.

Malgré de multiples tentatives, il n'arrive pas à ses fins. Son échec le conduit finalement, selon ses propres termes, à « un acte de désespoir » : il utilise la statistique de Boltzmann, son adversaire intellectuel, atomiste convaincu. En 1877, Ludwig Boltzmann avait relié l'entropie d'un système physique (liée à son

désordre) dans un état donné avec la probabilité qu'il soit réellement dans cet état, au moyen de la constante qui porte son nom. Pour calculer cette probabilité, il avait eu recours à une méthode de calcul fondée sur l'hypothèse selon laquelle l'énergie n'est pas continue (on dit qu'elle est discrète). Planck utilise la formulation probabiliste de l'entropie de son rival, ce qui le conduit à l'hypothèse des quanta d'énergie.

À l'époque, Planck ne se rend pas compte des conséquences qu'aura cette hypothèse sur la physique. D'ailleurs, plusieurs années après l'avoir formulée, il continue de la considérer comme une

solution provisoire. L'hypothèse des quanta ne commence à être acceptée qu'à partir de 1905, quand Albert Einstein l'utilise pour expliquer l'effet photoélectrique, ce qui lui vaudra le prix Nobel, en 1922. La communauté scientifique se « convertit » alors à la discontinuité : Einstein se sert à nouveau de l'hypothèse des quanta en 1907 pour élaborer une théorie des chaleurs spécifiques, suivi en 1912 par Peter Debye, Max Born et Theodor von Karman. En 1913, Niels Bohr la reprend pour élaborer son modèle atomique, que lui-même et Arno Sommerfeld améliorent en 1915 et 1916. L'hypothèse des quanta



2 Max Planck était aussi un pianiste émérite

n'est complètement intégrée à la physique qu'en 1925, avec l'avènement de la mécanique quantique et la statistique de Bose-Einstein.

LE CHEMINEMENT D'UNE THÉORIE

Dans l'expression de sa loi du rayonnement, Planck introduit deux constantes : la constante de Boltzmann k et la constante de Planck h . Leur utilisation dans ce contexte sera aussi lourde de conséquences que l'hypothèse des quanta. Bien que ces constantes aient déjà été découvertes respectivement par Boltzmann et par Wilhelm Wien, en 1893, pour tenter de résoudre le problème du corps noir, elles acquièrent une signification nouvelle et plus profonde avec les travaux de Planck. Celui-ci montre que k est le rapport entre la constante des gaz R et le nombre d'Avogadro N (le nombre de molécules contenues dans une mole). La constante R était déjà connue à l'époque, ainsi que k , donnée par les mesures expérimentales du spectre électromagnétique du corps noir. Planck calcule la valeur du nombre d'Avogadro N et du «quantum élémentaire de matière», la masse de l'atome d'hydrogène.

Avec N et la constante F de la loi de Faraday pour les électrolytes ($F = Ne$, où e est la charge de l'électron), Planck en déduit la valeur du «quantum élémentaire d'électricité», c'est-à-dire de e . Dès 1900, il considère que le calcul de ces quantités est «une conséquence importante de la théorie développée, qui rend possible une vérification expérimentale ultérieure». Il ajoute que ces «relations additionnelles» seront utiles aux autres domaines de la physique et à la chimie, car les grandeurs qu'elle met en jeu peuvent difficilement être déterminées par des méthodes directes.

LA VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE

Planck attribue une importance particulière à la détermination des valeurs précises des constantes h et k , car elles établissent un lien quantitatif entre la théorie électromagnétique et la théorie atomique. Ernest Rutherford et Hans Wilhelm Geiger apportent la première vérification expérimentale de la valeur du quantum d'électricité prévue par Planck. De leurs expériences sur les particules alpha, en 1908, ils déduisent une mesure de leur charge électrique ($2e$), en accord avec la valeur trouvée par Planck pour e . Puis, en 1914, James Franck et Gustav Hertz déduisent h du rapport h/e (comme le feront tous leurs successeurs, à moins qu'ils n'utilisent le rapport h/e^2). Les

physiciens excitent un atome en le bombardant d'électrons d'énergie eV , où V est le potentiel électrique qui accélère les électrons. Lorsque l'atome passe de l'état fondamental au premier état excité, il émet un rayonnement de fréquence ν . D'après le modèle de Bohr, l'énergie de ce rayonnement $h\nu$, est égale à l'énergie du faisceau d'électrons incidents eV , de sorte qu'il suffit de mesurer ν pour pouvoir calculer h/e . On peut appliquer le même raisonnement au passage d'un atome à un état excité d'énergie supérieure ou à un état ionisé.

En 1916, Robert Millikan utilise un autre moyen pour déterminer h . Il vérifie expérimentalement la théorie de l'effet photoélectrique d'Einstein, en mesurant l'énergie cinétique du photoélectron émis en fonction de plusieurs fréquences ν . Comme Einstein l'avait prévu, la relation entre ces deux grandeurs est linéaire, et la pente de la droite donne la valeur de h/e . Célèbre pour ses mesures de la charge de l'électron, en 1909, Millikan doutait de la validité de l'hypothèse des quanta de lumière, comme l'immense majorité des physiciens de l'époque. Une description courbusculaire des ondes électromagnétiques était si novatrice que, même après sa confirmation expérimentale par Millikan, l'idée des quanta de lumière mit plusieurs années à être acceptée.

Depuis, la précision des mesures a progressivement augmenté. Dans les années 1950, on utilisait encore des expériences liées à la dynamique des électrons et des photons, où, pour déduire les valeurs de h/e des quantités mesurées, on utilisait des expressions fondées sur la théorie de l'électrodynamique quantique. La situation change avec la découverte de l'effet Josephson, en 1962 et de l'effet Hall quantique en 1980, dans le cadre de recherches en physique des matériaux à basse température. Les mesures de h que l'on en a déduit alors sont les plus précises à ce jour.

Giulio PERUZZI est professeur d'histoire des sciences à l'Université de Padoue

Martin KLEIN, *Planck, Entropy and Quanta, 1901-1906*, in *The Natural Philosopher*, n° 1, pp. 83-108, 1963.

Hans KANGRO, *Early History of Planck's Radiation Law*, Taylor & Francis Ltd Londres, 1976.

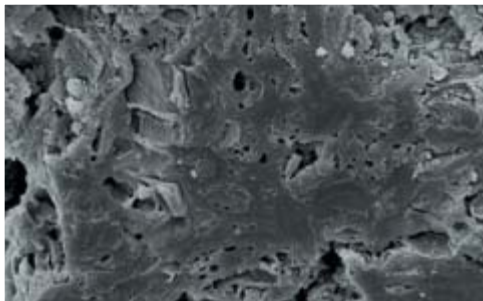
Thomas S. KUHN, *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912*, Clarendon Press, Oxford, 1978.

Brian W. PETLEY, *The Fundamental Physical Constants and the Frontier of Measurement*, Adam Hilger Ltd, Bristol et Boston, 1985.

Un loir dort depuis 50 millions d'années

Un fossile confirme que le loir existait déjà apparu en Europe, à l'Éocène

Le premier site allemand auquel l'UNESCO a conféré le statut de patrimoine de l'humanité est une vieille carrière abandonnée. Exploitée pour ses conglomérats granitiques jusqu'en 1962, la mine de Messel se situe à neuf kilomètres au Nord de Darmstadt. Si le profane perçoit mal l'intérêt de ce trou de 300 mètres sur 500, le paléontologue sait que l'endroit regorge de fossiles dans un état de conservation exceptionnel ; les premiers fossiles ont été découverts en 1875. Un fossile de loir, notamment, est d'un grand intérêt scientifique. Tandis que les restes de cette espèce se limitent d'ordinaire à quelques os ou à une poignée de dents, celui de *Eoglimiravus wildi* comporte non seulement un squelette complet, mais aussi des restes du pelage et même son contenu stomacal, témoin de son dernier repas ! Plaqué sur le schiste, l'animal semble un jeune mort de... 49 millions d'années !



Fossile du loir de 49 millions d'années découvert en Allemagne (il mesure 12 centimètres de la tête à l'extrémité de la queue). En haut, son contenu stomacal fossilisé qui a permis aux paléontologues de reconstituer son dernier repas.

Il a vécu au début de l'époque où sont apparus tous les groupes de mammifères, des rongeurs aux primates. Durant cette période, il y a quelque 55 millions d'années (les dinosaures ont disparu il y a 65 millions d'années), les mammifères se sont multipliés de façon quasi explosive. L'Europe était alors un archipel. Le climat de la région où se situe la carrière était probablement subtropical. La mine de Messel était un profond lac d'eau douce entouré d'une forêt dense de palmiers, de lauriers et autres thiers. Le lac se remplissait petit à petit de matière végétale en décomposition, dont les restes ont donné le substrat bitumineux qui entoure aujourd'hui les fossiles. La matière organique en décomposition consommait tout l'oxygène de l'eau et libérait des gaz toxiques, tel du dioxyde de carbone et du dioxyde de soufre, de sorte qu'une « zone de mort » existait au fond du lac de Messel. Aucun organisme nécrophage n'y survivait. Les cadavres des animaux du lac et de ceux des rives qui s'y étaient noyés ou qui y furent charriés par les ruisseaux ont subi une fossilisation minutieuse qui les a conservés.

Le petit rongeur récemment découvert fut particulièrement bien. Sa silhouette rappelle celle du loir moderne. Il mesure 12 centimètres (avec la queue) et devait peser 15 grammes environ (d'après la taille de ses dents). Les paléontologues ont identifié l'espèce du rongeur d'après les caractéristiques de sa dentition. Jusqu'à présent, *Eoglimiravus wildi* n'était connu que grâce à quelques dents qui provenaient de dépôts français plus anciens. Il passa



Un muscardin, cousin du loir de l'Éocène

pour être le plus ancien représentant de la famille des gliridés, laquelle comporte non seulement le loir gris, mais aussi le muscardin.

Les gliridés sont l'une des rares familles de mammifères originaires du vieux continent. Ils étaient plus diversifiés dans le passé : aujourd'hui, seules neuf espèces appartenant à cette famille de rongeurs vivent, en Europe, mais aussi en Afrique et en Asie. Elles sont difficiles à observer, notamment parce qu'elles hibernent.

Les gliridés appartiennent à la seule famille de rongeurs à s'être maintenue plus de 50 millions d'années. Toutes les caractéristiques de l'ancêtre du loir indiquent un mode de déplacement proche de celui de ses descendants. Sa queue touffue servait de parachute ou de balancier ; le tibia et le péroné étaient longs, ce qui facilitait les sauts de branche en branche ; les os n'étaient pas fusionnés, ce qui favorisait la mobilité de l'articulation du pied, si importante pour les petits rongeurs arboricoles ; les doigts longs offraient une large surface de contact avec le sol ou avec les branches. Ses pattes, munies de doigts serrés, recourbés et prolongés de griffes, étaient adaptés pour l'escalade sur l'écorce des arbres. Frappante, la ressemblance morphologique entre *Eoglimiravus wildi* et les gliridés actuels est confirmée par l'analyse de son dernier repas. Les restes végétaux identifiés au microscope électronique dans le contenu de son estomac montrent qu'il se nourrissait de graines, de fruits et de bourgeons. Tout indique que l'apparence du loir n'a guère changé depuis 50 millions d'années : c'était déjà un petit rongeur qui se déplaçait avec agilité dans le feuillage des arbres.

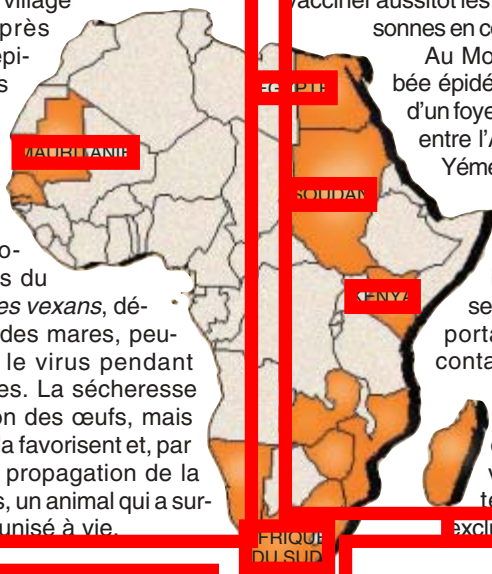
Gilles ESCARGUEL, CNRS
Christina SEIFFERT, Gerhard STORCH
Institut Senckenberg, Francfort

*La modélisation, associée
à la télésurveillance, améliore
la détection des foyers à risques*

Une maladie émergente vient de toucher le Moyen-Orient et a fait plus de 200 victimes en Arabie saoudite et au Yémen depuis quelques mois. Les responsables craignent de la «fièvre de la vallée du Rift», ne sévisse, jusqu'à présent, qu'en Afrique, où il continue ses ravages. Comme on ne peut vacciner tous les habitants des zones à risques, ni, *a fortiori*, ceux des régions qui étaient jusqu'alors épargnées, on essaie de prévoir les prochaines zones touchées en modélisant les épidémies. Ainsi, les autorités sanitaires pourraient prendre à temps les mesures de protection des populations menacées.

L'agent pathogène, un arbovirus (un virus transmis par plusieurs espèces de moustiques) atteint d'abord les ruminants : il tue la quasi-totalité des embryons en cours de gestation et des veaux. Les hommes sont contaminés à leur tour, soit par contact avec le sang d'un animal malade sur une plaie, soit par inhalation d'aérosol contenant le virus, ou encore par piqûre de moustique. La maladie se manifeste par des symptômes fiévreux, parfois suivis d'hémorragies mortelles.

En Afrique, l'émergence et la propagation des épidémies semblent aléatoires. La transhumance et le commerce du bétail facilitent l'apparition de nouveaux foyers ; parfois, la fièvre réapparaît dans un même village des années après une première épidémie, tandis qu'elle semble définitivement éradiquée dans d'autres zones. Selon les épidémiologistes, les œufs du moustique *Aedes vexans*, déposés au bord des mares, peuvent héberger le virus pendant plusieurs années. La sécheresse bloque l'éclosion des œufs, mais de fortes pluies la favorisent et, par conséquent, la propagation de la maladie. De plus, un animal qui a survécu reste immunisé à vie.



Principales zones africaines d'endémie

Nous avons considéré que les œufs des moustiques *Aedes vexans* sont les uniques réservoirs du virus et que l'immunité acquise par un troupeau décroît à mesure que les bêtes meurent. Nous avons ensuite élaboré un modèle qui prévoit l'évolution d'un foyer épidémique en fonction de l'alternance des périodes pluvieuses et sèches. Nos résultats semblent concorder avec les cycles épidémiques observés dans les villages de la région de Saint-Louis, au Sénégal, au cours des 20 dernières années.

Nous nous sommes également intéressés à la propagation des épidémies en considérant que chaque village est couplé aux autres par des liens qui représentent la transhumance et le commerce du bétail. Plus les échanges entre deux villages sont denses, plus le risque de propagation du virus est important. Nous attribuons à chaque connexion entre villages un coefficient proportionnel au risque de propagation. Aujourd'hui, nous évaluons ces interactions entre villages au Sénégal.

Une fois ce modèle au point, il sera couplé à une télésurveillance par satellite, destinée à suivre l'évolution de la maladie, dans le cadre du projet Emergence. Comme les systèmes de télésurveillance des satellites visualisent le niveau des mares, on pourrait prévoir l'émergence d'une épidémie plus ou moins grave selon la date du dernier épisode de la fièvre. Si la précédente épidémie est récente, les bêtes sont encore immunisées et le nouvel épisode de fièvre ne sera pas grave. Inversement, si le bétail n'est plus immunisé, l'épidémie fera des ravages. Puis l'épidémie touche les villages limitrophes, et ceux avec lesquels des échanges sont fréquents. Le modèle évaluera les villages à risques et on pourra lancer des « alertes précoces » afin d'y vacciner aussitôt les troupeaux et les personnes en contact avec les bêtes.

Au Moyen-Orient, la flambée épidémique semble issue d'un foyer unique à la frontière entre l'Arabie saoudite et le Yémen. Elle résulterait non pas de fortes pluies puisqu'il n'y avait pas de moustiques infectés jusqu'à présent, mais plutôt de l'importation de bétail contaminé. Cette émergence de la fièvre au Moyen-Orient indique que la propagation du virus au bassin méditerranéen n'est pas

Marc DUBOIS (CEA
Philippe SABATIER (INRA, ENV-Lyon)

BRÈVES

Un hominidé de six millions d'années

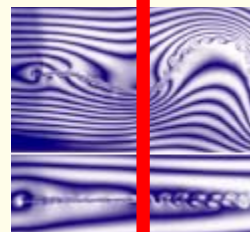
Des ossements d'hominidés vieux de six millions d'années ont été mis au jour dans le Nord-Ouest du Kenya. Jusqu'à cette découverte, les fossiles humains les plus anciens dataient de 4,5 millions d'années et avaient été découverts en Éthiopie. Les paléontologues français et kenyans ont trouvé des morceaux de mâchoire, des dents, des os de bras et de jambe, ainsi qu'un doigt, dispersés sur trois sites. Ces restes appartenaient à au moins cinq individus, dont un jeune âgé de six ans. Ces hominidés grimpaient aux arbres avec agilité, mais se déplaçaient déjà en position debout lorsqu'ils étaient au sol. L'un des fémurs porte des traces de morsures d'hominidé à dû être tué et dévoré par un grand carnassier.

L'Univers se rafraîchit

Lorsque l'Univers n'avait que trois milliards d'années, sa température était comprise entre 6 et 14 kelvins (-267 et -259 °C) d'après les astrophysiciens du Centre de Pune en Inde. Ils ont déduit ce résultat de leur observation de la lumière absorbée par un nuage de gaz très éloigné de la Terre, venant d'un quasar. Cette absorption dépend de la température du nuage, qui reflète la température à laquelle se trouvait l'Univers quand la lumière en est partie (il y a 12 milliards d'années). Aujourd'hui, l'Univers a 15 milliards d'années et sa température est de 2,73 kelvins. Ces résultats confortent la théorie du Big Bang, selon laquelle l'Univers s'est refroidi depuis sa formation.

La taille critique du drapeau

Les mouvements d'un drapeau dans le vent et ceux d'un poisson dans le courant se ressemblent, mais on les comprend mal. Pour les étudier, des physiciens de l'Université de New York ont accroché un filament souple dans un flux laminaire (sans turbulence) de savon liquide. Ils ont observé que des filaments courts (dont la longueur est inférieure à une valeur critique) restent droits dans le courant. Quand la longueur dépasse la valeur critique, le filament se met à ondoyer comme un drapeau. Ce résultat contredit l'opinion selon laquelle les drapeaux sont toujours instables. Gageons que les poissons sont tous au-dessus de leur taille critique!



Caméra cachée

Le tube digestif est en contact avec l'extérieur, mais son examen n'est ni aisé ni agréable. L'endoscopie, qui consiste à introduire une mini caméra placée à l'extrémité d'un dispositif qui, d'une part, éclaire la zone observée et, d'autre part, enregistre les images, est souvent mal tolérée. Fondée sur le même principe, mais d'un usage notablement plus aisé, les « pilules » de un centimètre sur trois contiennent une caméra, des piles et un dispositif de repérage. La caméra ultrasensible fonctionne même dans des conditions de faible luminosité. Les patients avalent une caméra le matin, laquelle est récupérée quelques heures plus tard « naturellement ». Pour le moment la méthode est validée par des colonoscopies. Le dispositif en cours d'évaluation a révélé des lésions intestinales que les méthodes classiques n'avaient pas repérées.

Gaz de billes

Mêmes les « gaz de billes » ressemblent aux gaz parfaits. On obtient de tels « gaz » en faisant vibrer une boîte transparente remplie de billes d'acier ; l'épaisseur de la boîte photographiée par la caméra excède de peu le diamètre des billes (un millimètre). Les physiciens de l'Université du Massachusetts ont mesuré à l'aide d'une caméra rapide la distribution des vitesses de ces billes. Elle ressemble à celle que vérifient les gaz parfaits, la loi de Maxwell. Maxwell avait précisément fait l'hypothèse que les molécules d'un gaz parfait se comportent comme des billes. Des gaz de billes aux gaz parfaits, une seule différence, un exposant dans la loi de Maxwell !

Singes dactylographes

Pour illustrer l'impossible « retour en arrière » des phénomènes physiques, Émile Borel évoque une armée de singes dactylographes qui, tapant au hasard sur une machine à écrire, reconstitueraient une œuvre littéraire, voire « la copie exacte des livres de toute nature et de toutes langues conservés dans les plus riches bibliothèques du monde ». Cette comparaison a été décrite par d'autres : Joseph de Maistre, en 1814, dans son *Essai sur les principes générateurs de la révolution française*, mentionne des lettres lancées en l'air qui reconstitueraient Athalie, la pièce de Racine et cite Cicéron dont semble-t-il, l'idée proviendrait.

Premières orbites autour d'un trou noir

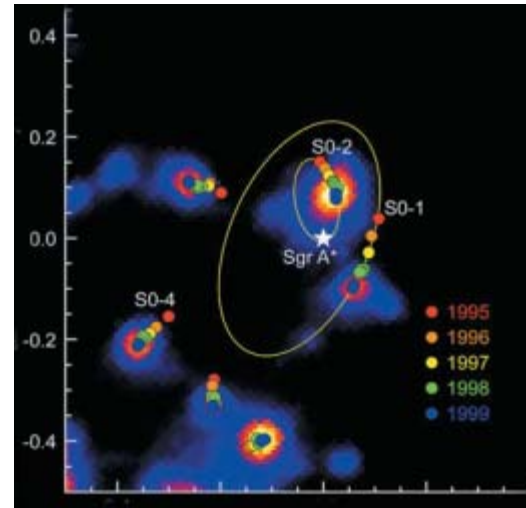
Les astrophysiciens précisent la position et la valeur de l'énorme masse qui se trouve au centre de la Voie lactée.

La présence d'un trou noir au centre de notre Galaxie est de plus en plus probable. Située dans la constellation du Sagittaire, cette région a attiré depuis longtemps les astrophysiciens de par son exceptionnelle concentration stellaire, laquelle indique la présence d'un puissant centre d'attraction. Pour connaître sa nature, plusieurs équipes internationales scrutent la région depuis dix ans, et mesurent les vitesses apparentes des astres qui y gravitent. Pour la toute première fois, les astrophysiciens ont réussi à mesurer l'accélération exercée par le trou noir sur certaines étoiles.

La première vitesse apparente d'une étoile, la vitesse radiale, est sa vitesse d'éloignement ou de rapprochement. Les astrophysiciens la déduisent des déformations du spectre de l'astre, dont ils choisissent l'une des raies d'émission pour en mesurer le décalage en fréquence. Nommé « décalage Doppler », ce dernier est proportionnel à la vitesse de l'émetteur de la raie. La mesure est difficile, car les poussières interstellaires obscurcissent le centre de la Galaxie dans le visible comme dans l'infrarouge proche. Seuls les spectres de quelques dizaines d'étoiles, particulièrement brillantes, sont utilisables.

Le second type de vitesse apparente est la composante perpendiculaire à la vitesse radiale. Nommée « vitesse sur le plan du ciel », elle est aussi difficile à mesurer tant le champ observé est encombré. Seules 190 étoiles très brillantes se distinguent assez pour pouvoir être suivies dans le temps. Deux techniques donnent aux astrophysiciens la résolution spatiale nécessaire : le « recentrage à pose courte » et l'optique adaptative. La première consiste à enregistrer très vite des images, sans laisser le temps à la turbulence atmosphérique de les brouiller puis à les additionner ; dans la seconde technique, des miroirs sont déformés pour compenser l'effet de cette turbulence.

L'ensemble de ces mesures révèle l'extrême agitation stellaire du centre galactique. Mesurées par rapport au centre d'attraction, les vitesses des étoiles rapides qui y gravitent dépassent le millier de kilomètres par seconde.



On déduit des trajectoires ellipsoïdales des étoiles du centre de la Galaxie que ces dernières gravitent autour d'une masse de quelque trois millions de fois celle du Soleil. Un trou noir ?

Pour comparaison, le Soleil et son cortège de planètes orbitent dans la Galaxie à quelque 220 kilomètres par seconde. Pour les astrophysiciens, seule la présence d'une petite zone extrêmement dense peut être à l'origine d'une agitation pareille. Les trajectoires stellaires observées sont explicables si l'on suppose que cette zone est quasi ponctuelle et que sa masse est d'environ trois millions de masses solaires. Si c'est vraiment le cas, il s'agit probablement d'un trou noir. Quelle serait sa position ? Les analyses les plus récentes livrent une distance du centre galactique au Soleil de l'ordre de 25 000 années lumière.

L'hypothèse de la présence d'un trou noir au centre galactique a été encore confortée par l'équipe d'Andrea Ghez de l'Université de Californie, qui, grâce au puissant télescope Keck d'Hawaii, a mesuré l'accélération de certaines étoiles brillantes proches. A. Ghez et ses collègues ont ainsi montré que les vecteurs de plusieurs accélérations stellaires pointent dans la direction du trou noir présumé ! La méthode de l'équipe livre des résultats sur la position du trou noir quatre fois plus précis que les estimations antérieures. De plus, chance supplémentaire, l'ellipse que décrit l'une des étoiles étudiées, S0-1, indique une période orbitale de 15 ans. Pour la première fois, les astrophysiciens vont assister au cours de leur vie à plusieurs évolutions d'une étoile gravitant autour d'un trou noir de trois millions de fois la masse solaire !

Christophe PICHON
Observatoire de Strasbourg

Colle de verre

Les verres bioactifs soudent les prothèses orthopédiques à l'os.

Aujourd'hui, la population vieillit. L'«épidémie» de fractures du col du fémur est devenue un problème de santé publique. Une intervention chirurgicale sur une personne âgée, notamment la pose d'une prothèse de titane, est souvent accompagnée d'un cortège de complications. Toute amélioration des prothèses renforce le confort des personnes ayant une fracture : les bioverres accéléreraient la soudure de la prothèse à l'os.

Aujourd'hui, la majorité des prothèses orthopédiques sont composées d'alliages de titane. Ils sont biocompatibles, c'est-à-dire qu'ils sont bien tolérés par l'organisme et déclenchent peu de mécanismes de rejet. En revanche, comme ils adhèrent souvent mal à l'os, on les recouvre d'apatite, le constituant principal des os. Toutefois, ces revêtements se fixent mal aux prothèses et la soudure avec l'os s'établit lentement. La prothèse risque de se déplacer au cours des premières semaines après son implantation dans l'os, ce qui engendre parfois des frottements, à l'origine d'inflammations.

Les verres bioactifs (à base de silice et d'oxydes de sodium, de calcium, de potassium et de phosphore) pourraient remplacer les revêtements d'apatite, car ils s'intègrent vite à l'os, comme le montrent les expériences menées par Édouard Jallot et son équipe du Laboratoire de microscopie électronique à l'Université de Reims. Souvent perçus comme des matériaux inertes, les verres bioactifs établissent des liaisons chimiques, notamment avec les os.

Le verre bioactif, réduit en poudre, est projeté à haute température sur de petits cylindres de titane. La couche déposée ne dépasse pas 80 micromètres d'épaisseur. Ces cylindres ont été implantés dans des fémurs de mouton. Dès la mise en contact avec l'os, les éléments du bioverre commencent à migrer. L'os est en perpétuel remaniement, c'est-à-dire qu'une fraction est en résorption pendant que de l'os neuf se construit. Il est poreux pour laisser circuler les fluides biologiques, notamment le sang, qui alimentent l'os. On constate que, peu à peu, la matrice du bioverre se délite et se transforme en un gel. À sa périphérie, se forme une couche de silicium qui entraîne l'apparition de gradients de concentration dans le verre. Ils favorisent la diffusion du calcium et du phosphore du verre vers l'os. L'interface entre le bioverre et l'os finit par être saturée en calcium et en phosphore, de sorte que le produit de solubilité de ces ions étant



Le bioverre (en haut) favorise la formation d'une couche d'apatite (plus claire, au centre), cimentant provisoirement le bioverre avec l'os (en foncé).

atteint, des réactions de précipitation se produisent : des grains sphériques riches en calcium et en phosphore apparaissent et le rapport de leurs concentrations est proche de celui de l'apatite naturelle. Les grains grossissent, fusionnent et finissent par former une couche d'apatite cimentant entre l'os et le verre. Ensuite, l'os produit suffisamment d'apatite pour se souder à l'implant métallique. Six mois plus tard, la couche-ciment disparaît, laissant l'implant bien en place.

Ainsi, un revêtement en verre bioactif sert de soudure entre les prothèses et l'os, grâce à la formation spontanée à l'interface d'une couche d'apatite. Les premiers essais sur le mouton sont concluants. Reste à tester la méthode sur l'homme, où, plutôt sur la femme, la principale victime des fractures du col du fémur.

Michel-Ange, maître d'anatomie

Une femme sculptée par l'artiste de la renaissance avait un cancer du sein.

Un visiteur de la chapelle des Médicis, dans l'église San Lorenzo, à Florence, admirera sans doute la beauté de *La nuit*, une sculpture allégorique en marbre de Michel-Ange (1475–1564) qui a son pendant dans la même chapelle, *L'aube*, mais il négligera un détail que seul un médecin remarquera. À l'instar de James Stark, du Centre de cancérologie de Portsmouth et Jonathan Katz Nelson, de l'Université de New York, ce médecin ne manquerait pas de noter une étrange anomalie sur le sein gauche de la femme sculptée, indiquant qu'elle souffrait d'un cancer du sein.

Plus précisément, le sein sculpté présente trois anomalies. La plus évidente est une proéminence à droite du mamelon. Par

ailleurs, l'aréole (la zone pigmentée qui entoure le mamelon) est légèrement gonflée, ce qui traduit une inflammation. Cependant, ces deux symptômes pourraient être le signe d'une tumeur bénigne ou d'un abcès d'une femme qui allaitait son enfant.

En revanche, à côté du mamelon, la peau s'est rétractée. Cette rétraction cutanée atteste plus sûrement d'un cancer : elle est due à une désorganisation de l'architecture du sein composé de cellules glandulaires et graisseuses que les cellules tumorales attirent. Ces trois symptômes caractérisent une tumeur située au niveau du mamelon. Les cellules devenues cancéreuses étaient soit celles du mamelon lui-même, soit celles de ganglions lymphatiques sous-jacents.

Aujourd'hui, les cancérologues confirment les présomptions par un examen mammographique et par l'observation au microscope de quelques cellules prélevées au cours d'une biopsie.

Ces anomalies sont-elles des erreurs du sculpteur ? Traduisent-elles une œuvre inachevée ? Selon les deux médecins qui les ont remarquées, Michel-Ange a sans doute fidèlement

reproduit un modèle qui avait un cancer du sein. Au XVI^e siècle, les médecins connaissaient ce type de pathologie, précisément décrit dans les ouvrages des médecins de l'Antiquité tels Hippocrate et Galien, et du Moyen Âge, tel Avicenne.



La nuit, œuvre allégorique de Michel-Ange, est représentée par une femme dont le modèle avait un cancer du sein gauche : en témoignant une grosseur du sein, une aréole déformée et la peau rétractée à proximité.

Détection des amibes pathogènes

Les amibes pathogènes provoquent des intoxications alimentaires graves chez les amateurs de coquillage. Elles seront bientôt détectées en quelques heures grâce à une technique mise au point par des chercheurs de l'observatoire océanographique de Banyuls-sur-Mer et de la Société Chemunex. D'abord marquée avec un anticorps fluorescent, spécifique des amibes, la solution à analyser est filtrée sur une membrane. Le faisceau d'un laser à l'argon déclenche la fluorescence de la solution, lorsque des amibes sont présentes. La méthode révèle la présence ou l'absence d'amibes en quatre heures, tandis que les méthodes classiques de cultures des micro-organismes nécessitent plusieurs jours.

Albatros instrumentés

Un albatros en vol dépense si peu d'énergie, qu'il parvient, en une saison, à parcourir jusqu'à 150 000 kilomètres. Ces résultats ont été obtenus au centre d'études du CNRS de Chizé. Grâce à des mesures en laboratoire, les biologistes ont montré que la fréquence cardiaque de l'oiseau est directement liée à sa dépense énergétique. Puis, ils ont «équipé» plusieurs oiseaux partant en mer d'un enregistreur de fréquence cardiaque, d'une balise Argos et d'un enregistreur d'activité (l'ensemble du dispositif n'excédait pas 80 grammes). Ils ont ainsi relié la dépense énergétique instantanée des oiseaux à leur activité et aux paramètres météorologiques (la vitesse du vent et la température de l'eau). Le rapport de la dépense énergétique de l'oiseau en activité et de son activité au repos est le plus faible connu.

Plaidoyer pour les avocats

Des biologistes japonais ont découvert que l'avocat contient des substances qui minimisent certaines lésions du foie. On a déclenché des lésions chez le rat au moyen d'une toxine hépatique. Ces lésions ressemblent à celles dues à une hépatite virale. Afin d'évaluer l'activité de divers aliments sur ces lésions, on a nourri les rats avec 22 types de fruits différents et l'on a constaté que l'activité de l'avocat l'emporte. L'avocat contient des acides gras monoinsaturés qui abaissent la concentration en cholestérol. Il est riche en vitamines, en fibres, en potassium... Une nouvelle vertu s'ajoutera-t-elle à la liste?

Les tiques du python

Des parasites, indicateurs de la maturité sexuelle.

Le succès reproducteur d'un animal se mesure à l'aune de l'efficacité avec laquelle il transmet ses gènes aux générations futures ; il est génétiquement interprété comme le nombre total de descendants qu'il aura tout au long de sa vie sexuelle, lesquels se reproduiront à leur tour. Selon la théorie de la sélection naturelle, chacun tente d'optimiser son succès reproducteur et adopte, pour ce faire, une grande variété de stratégies reproductrices. Pour certaines espèces, il est plus efficace en termes de succès reproducteur de produire peu de jeunes de «très bonne qualité», tandis que pour d'autres, le salut passe par un nombre important de descendants (jusqu'à plusieurs millions) de petite taille. Quantité et qualité des nouveau-nés constituent deux déterminants du succès reproducteur, dont nous avons percé quelques secrets chez le python royal.

Les déterminants du succès reproducteur ont été étudiés pour plusieurs espèces de serpents. On sait que les mâles doivent, à la saison des accouplements, parcourir la plus grande surface possible de leur habitat à la recherche de femelles, afin d'en féconder le maximum. Toutefois, pour évaluer le succès reproducteur, on doit connaître la période d'activité sexuelle d'un animal et, notamment, sa taille qui détermine souvent la maturité sexuelle et qui, par conséquent, est en partie liée à l'âge des animaux. Nous voulions faire cette étude sur le python royal (*Python regius*), au Togo. Toutefois, la biologie de cette espèce étant mal connue, nous ne savions comment déterminer l'âge de la maturité sexuelle chez les mâles. Pour les femelles ovipares de ces serpents, on estime qu'elle atteint leur maturité sexuelle lors de la première ponte, c'est-à-dire en moyenne



orsqu'elles mesurent 102 centimètres. Quand on ne peut pas observer directement une parade amoureuse ou un accouplement, on ne peut déterminer la taille des mâles qui ont atteint leur maturité sexuelle et chez qui les caractères sexuels secondaires sont très discrets, voire absents.

La solution était dans les tiques... Les serpents ne sont pas épargnés par les parasites, et il n'est pas rare de trouver une quantité de tiques dans les replis de leur peau. Nous avons découvert que chez tous les pythons, quels que soient leur âge et leur sexe, sont parasités par des tiques, les mâles le sont davantage que les femelles. Nous pensions que plus un python est long, plus il devrait être parasité, la surface offerte étant supérieure. Or chez les femelles, il n'en est rien : la taille n'influe pas sur le nombre de tiques qu'elles portent. Inversement, chez les mâles, le nombre de tiques accrochées est directement proportionnel à la taille. Pourquoi cette différence? Les pythons mâles utilisent les mêmes niches écologiques et les mêmes terriers que les femelles et consomment les mêmes proies. Nous avons alors émis l'hypothèse que cette différence était fondée sur... le succès reproducteur.

C'est vraisemblablement au cours de leurs voyages à travers la savane africaine à la recherche de femelles à féconder, que les pythons mâles, davantage exposés, sont parasités. Au contraire, comme chez de nombreux serpents, les femelles de pythons se contentent d'attendre les mâles, lors de la saison des accouplements, à l'abri dans un terrier ; elles y pondront leurs œufs et les couvriront durant plusieurs mois. Le nombre de tiques est proportionnel à la taille des mâles, car les plus grands se déplacent vite et parcourent de grandes distances, dépistant davantage de femelles, mais aussi s'exposant à plus de parasites.

Une fois que nous avons compris que le nombre de tiques révèle la maturité sexuelle des mâles, nous avons dénombré les tiques en fonction de la taille des pythons et découvert que leur nombre augmente notablement à partir de 80 centimètres. Une précision sur la biologie de cette espèce encore mal décrite.

Fabien AUBRET et Xavier BONNET
CECB - CNRS



La quantité de tiques (ci-dessus) présentes sur la peau des pythons royaux mâles (en haut à droite) est un marqueur de leur maturité sexuelle.

Une banque de café arabica

Une nouvelle méthode de

Parmi les 80 espèces de caféiers répertoriées dans le monde, seules deux d'entre elles sont cultivées : *Coffea arabica* et *Coffea canephora*, alias Robusta. L'arabica est deux fois moins amer, plus aromatique et contient deux fois moins de caféine que le Robusta, mais résiste moins bien aux parasites. Comment améliorer les variétés cultivées pour qu'elles allient qualités gustatives et résistance aux parasites ? Les biologistes de l'Institut de recherche pour le développement (IRD) étudient le génome des différentes espèces de café, afin de repérer les caractères qui les intéressent et les possibilités de les introduire par hybridation dans les variétés cultivées. Pour étudier toutes les ressources génétiques de café, ils doivent le conserver longtemps : Stéphane Dussert et ses collègues, de l'IRD de Montpellier, ont mis au point une technique de conservation des graines d'Arabica dans l'azote liquide.

Contrairement aux graines des espèces cultivées sous les latitudes tempérées, les graines du café ne supportent pas la déshydratation ni les basses températures. Aujourd'hui, les collections de café sont conservées « au champ », c'est-à-dire sous forme de plantations qui doivent être cultivées et entretenues (la plus importante se trouve au Costa Rica). Elles sont coûteuses et exposées aux aléas climatiques, aux maladies et aux attaques des ravageurs. Comment pourrait-on conserver des graines « hors champ » ?

Elles ne survivent pas à une immersion directe dans l'azote liquide, car l'eau qu'elles contiennent déchire les mem-

branes cellulaires lorsqu'elle se transforme en glace. Les graines sont placées dans des enceintes dont le taux d'humidité est abaissé, afin que la déshydratation ait lieu. Au cours de la phase suivante de congélation, l'eau résiduelle forme une phase qui n'endommage pas l'intégrité des cellules. Cette phase commence par un refroidissement lent jusqu'à -50°C , où les lipides cristallisent sous une forme qui ne met pas la survie des cellules en danger. Alors seulement, les graines sont plongées dans l'azote liquide.

Pour que les graines retrouvent leur pouvoir germinatif, les biologistes de l'IRD les réchauffent, puis les réhydratent en les plaçant dans une solution dont le potentiel osmotique (les concentrations en électrolytes non diffusibles) est adapté pour que l'eau pénètre lentement dans les graines. Adaptée aux graines de café, cette méthode semble de surcroît, réparer certains dommages dus au procédé de cryoconservation. Elle inhiberait notamment les radicaux libres nuisibles, responsables des réactions d'oxydation qui accélèrent le vieillissement des cellules. Les grains de café pourraient ainsi être conservés de façon quasi illimitée. Grâce à ce procédé, on dispose aujourd'hui de la première cryobanque de *Coffea arabica*, version moderne de la collection au champ.



Graines de *Coffea arabica*

220 millions d'années, 23 mètres de long...

Comment se nourrissait le plus grand reptile marin ?

En 1994, la paléontologue canadienne Elisabeth Nicholls a découvert un ichtyosaure, reptile marin géant vieux de 220 millions d'années, dans une roche du sud-est de la Colombie britannique. Depuis, les paléontologues travaillent à la récupération de ce fossile. Le travail est titanesque : le fossile est sur un terrain accidenté et boisé, la rivière recouvre les roches contenant le fossile une partie de l'année, et le climat est si rigoureux qu'on ne peut creuser que pendant quelques semaines en été. Encore faut-il lutter contre les moustiques qui infestent la région, et se garder des grizzlis et ours noirs qui rôdent aux alentours.

Après plusieurs années de travail, E. Nicholls et son équipe de 17 paléontologues ont dégagé, en 1999, le crâne et les éléments de nageoires enfouis dans le calcaire pour en étudier les caractéristiques au laboratoire. Le crâne comporte

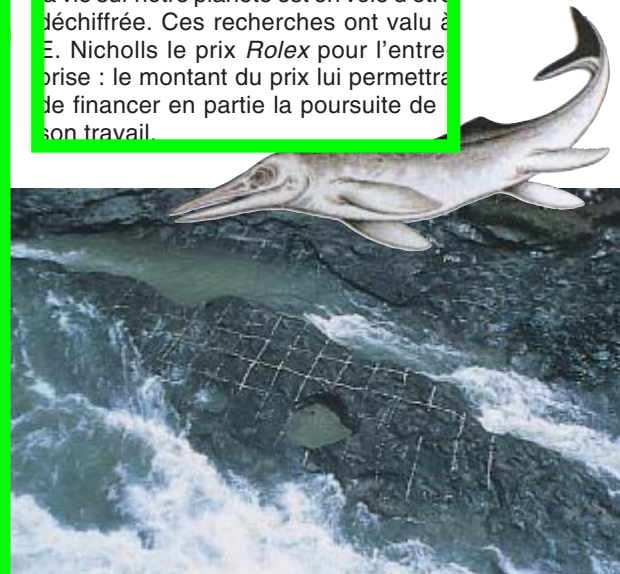
un museau allongé qui ressemble à celui du grand dauphin moderne, mais en beaucoup plus volumineux. Les cinq blocs de calcaire contenant le crâne ont été enlevés par hélicoptère et convoyés au Royal Tyrrell Museum pour être analysés.

Quand la mâchoire aura été reconstituée, l'énigme de l'alimentation de ce reptile sera élucidée. La question est d'importance : la plupart des grands animaux marins trouvent leur nourriture dans l'eau de mer en filtrant celle-ci à travers une série de fanons fixés à leurs mâchoires. Le cachalot est la seule exception parmi les grosses baleines : il a des dents pour saisir et mastiquer ses proies, par exemple le calmar géant. Quel était le mode d'alimentation de notre ichtyosaure ? L'étude de sa dentition constituera un jalon décisif dans notre connaissance des reptiles marins préhistoriques. Le crâne est en cours d'examen à l'aide de marteaux-piqueurs miniatures... Le grand espoir est

que l'estomac de l'animal contiendra des restes de nourriture. La taille de ce nouveau spécimen retient l'attention, mais quand les caractéristiques des os seront décrites, peut-être retrouvera-t-on dans

les tiroirs des musées d'autres ossements semblables, ce qui permettrait de préciser son implantation géographique.

Une nouvelle page de l'histoire de la vie sur notre planète est en voie d'être déchiffrée. Ces recherches ont valu à E. Nicholls le prix *Rolex* pour l'entreprise : le montant du prix lui permettra de financer en partie la poursuite de son travail.



Site du fossile de l'ichtyosaure, la rivière *Sikanni Chief* : le quadrillage repère les différentes parties de l'animal et correspond au découpage de la roche avant son enlèvement par hélicoptère pour étude au laboratoire. En haut, reconstitution d'un ichtyosaure

Prairies sous dioxyde de carbone

Les prairies pourraient jouer le rôle de réserve de carbone, imitant ainsi l'effet de serre

La concentration du gaz carbonique augmente. Elle est aujourd'hui supérieure d'un tiers à la valeur qu'elle avait avant l'ère industrielle, et à quelques 100 ans, et d'après les prévisions, elle devrait doubler d'ici 50 ans, ce qui devrait se traduire par une hausse de la température moyenne de près de 3 °C. Jean-François Soussana et Pierre Loiseau du Centre de recherche de l'INRA de Clermont-Ferrand ont étudié les répercussions de ces changements climatiques sur la croissance de l'herbe dans les prairies. Ils en concluent que la production des prairies augmentera, de sorte que les éleveurs pourraient nourrir davantage d'animaux.

Les agronomes voulaient étudier les conséquences d'un doublement de la concentration en dioxyde de carbone et d'une augmentation de la température de 3 °C, les autres conditions climatiques restant inchangées. Pour ce faire, ils ont planté une espèce de graminée très commune dans les prairies françaises sur un sol limoneux initialement pauvre en matière organique. Ils ont protégé les plantations par trois «tunnels» de polyéthylène. Ils ont fait circuler dans deux des tunnels une concentration en dioxyde de carbone deux fois supérieure à la normale, et la température de l'un des tunnels était maintenue à 3 °C au-dessus de la température ambiante. Un des tunnels laissés dans les conditions ambiantes servait de référence.



Une parcelle de prairie a été exposée durant plusieurs mois à une concentration élevée en dioxyde de carbone ; le gaz était diffusé par les anneaux sur le couvert végétal. Le rendement a été amélioré, mais les caractéristiques biologiques des plantes ont été modifiées.

Afin d'évaluer comment les graminées absorbent l'azote sous concentration élevée en dioxyde de carbone, les agronomes ont stimulé la croissance de l'herbe à l'aide d'un engrais azoté. Puis, ils ont arrosé les prairies et imité la fauche et le pâturage en tondant à intervalles réguliers.

Que peut-on conclure de cette étude ? Pour les plantes, le dioxyde de carbone est une ressource puisqu'elles fabriquent leurs tissus grâce à la photosynthèse. Afin d'apprécier l'effet de l'accroissement de cette ressource, les agronomes ont étudié le cycle du carbone dans leurs prairies modèles. Pendant les deux ans et demi qu'a duré l'expérience, ils ont fait le bilan des échanges gazeux aériens et souterrains. Ils ont aussi suivi le trajet souterrain du dioxyde de carbone qui avait été marqué au carbone 13. Ces mesures montrent que la photosynthèse augmente et que les échanges entre le compartiment souterrain et l'atmosphère sont de plus en plus rapides et intenses. En réaction à l'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique, le sol stocke notablement plus de carbone. On en déduit que les prairies pourraient jouer un rôle de «puits de carbone».

Ces modifications du cycle du carbone s'accompagnent aussi d'un changement du cycle de l'azote dans le sol : la disponibilité de l'azote minéral pour les végétaux diminue et le développement de l'herbe et autres légumineuses est favorisé. Si le comportement des plantes évolue, leur valeur nutritive aussi. D'après diverses mesures, l'herbe qui pousse en présence d'une concentration supérieure en dioxyde de carbone contient plus de sucres solubles : elle a, par conséquent, une plus grande valeur énergétique, mais contient moins de protéines. Ces résultats ont été confirmés au cours d'une seconde expérience : des blocs de prairie semi-naturelle ont été exposés durant deux ans à une atmosphère contrôlée de dioxyde de carbone émise par des anneaux diffusant le gaz sur le couvert végétal (voir l'illustration).

Ainsi, l'effet de serre et le changement climatique qu'il provoque devraient augmenter le rendement d'une prairie du Massif central de quelque 20 pour cent, à condition que la pluviométrie ne change pas. Toutefois, ces résultats sont fondés sur des données expérimentales obtenues grâce à une augmentation brutale de la concentration en dioxyde de carbone. Or, loin d'être brusque, l'augmentation de cette concentration dans l'atmosphère s'étalera sur plusieurs dizaines d'années. Sur une telle période, les plantes évolueront, de même que les pratiques agricoles et celles des éleveurs. Quoi qu'il en soit, l'effet de serre aura sans doute des effets inattendus.

Le mystère du fond diffus

Les rayons X qui baignent le cosmos viendraient du cœur brillant des galaxies.

Dans les années 1960, dès les premières observations du rayonnement X interstellaire, avec des instruments embarqués dans des sondes, les astrophysiciens ont mis en évidence la présence d'un fond diffus : une émission continue de rayons X qui baigne tout le cosmos. Quelle en est l'origine ? Les rayons X sont libérés lors de phénomènes qui mettent en jeu des énergies énormes, où les températures sont comprises entre un million et 100 millions de degrés. Le rayonnement du fond diffus est-il émis par une multitude de sources ponctuelles que l'on n'a pas encore repérées ou est-il émis par le gaz chaud qui est présent entre les amas de galaxies ? Les données transmises par le satellite XMM-Newton et qui ont été étudiées par Philippe Ferrando et ses collègues, du Service d'astrophysique du Commissariat à l'énergie atomique de Saclay, confirment la première hypothèse et nous éclairent sur la nature des sources ponctuelles.

Depuis 30 ans, les astrophysiciens ont essayé de détecter des sources ponctuelles de rayons X dont la sommation des émissions reconstituerait le fond diffus. Toutefois, dans notre Galaxie, des nuages de gaz absorbent les rayons X de faible énergie (inférieures à un kiloélectronvolt). Les observations se sont donc portées sur une région du ciel, où le gaz interstellaire est moins dense : le «pointé de Lockman», dans la constellation de la Grande Ourse, qui, en absorbant peu de rayons X de faible énergie, autorise une analyse sur une large gamme d'énergie.

Les satellites qui ont précédé XMM-Newton ont détecté des sources ponctuelles responsables de 80 à 90 pour cent du fond diffus dans la gamme des faibles énergies (de 0,5 à 2 kiloélectronvolts) et de 30 pour cent, des énergies moyennes et hautes (entre 2 et 5 kiloélectronvolts pour les énergies moyennes et entre 5 et 10 pour les énergies élevées). Avant XMM-Newton, on ignorait l'origine des 10 pour cent de faibles énergies et des 70 pour cent des énergies moyennes et élevées restants.

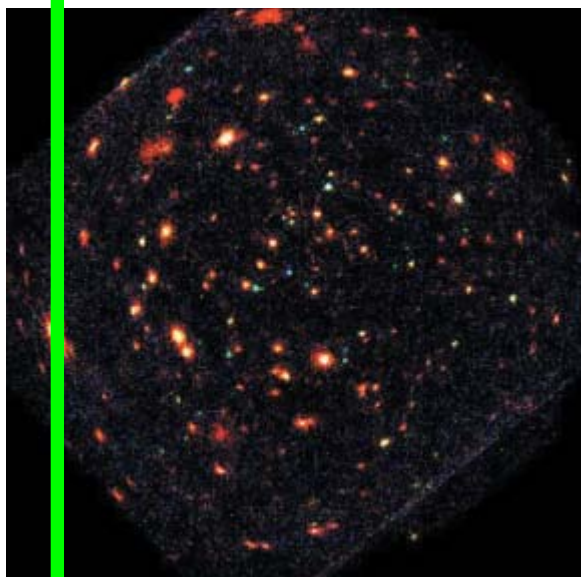
Les rayons X sont très pénétrants et traversent les miroirs de détection des télescopes, sauf pour des incidences

asantes : plus les rayons X sont énergétiques, plus leur incidence doit être rasante sur les miroirs pour qu'ils soient réfléchis et détectés au lieu d'être absorbés. Pour les rayons X de haute énergie, la surface efficace des miroirs de détection des télescopes est petite, de sorte qu'on les détecte moins bien que les rayons X de faible énergie. Grâce à sa grande surface de détection – qui lui confère une sensibilité exceptionnelle – le satellite XMM-Newton est capable de détecter des sources ponctuelles d'intensité 20 fois plus faibles que ses prédécesseurs. On a ainsi dénombré et identifié plusieurs nouvelles sources ponctuelles de rayons X, de faible, mais aussi de haute énergie. Aujourd'hui, grâce aux données acquises par XMM-Newton, on a détecté les sources qui produisent 60 pour cent du fond diffus de haute énergie : à lui seul, ce satellite a repéré autant de sources de rayons X de hautes énergies que tous les satellites qui l'avaient précédé.

D'après l'analyse des données fournies par le satellite, ces sources

seraient des trous noirs situés au centre de certaines galaxies, dont la masse correspondrait à plusieurs centaines de millions de fois la masse du Soleil. Ces trous noirs attireraient de la matière, qui

s'échaufferait à mesure qu'elle serait attirée et émettrait des rayons X de haute énergie. De fait, ils apparaissent comme des cœurs « brillants » (dans le domaine X) au centre des galaxies.



Le satellite XMM-Newton, qui détecte les rayons X (en rouge pour les basses énergies et en vert et bleu pour les hautes énergies) a révélé que 60 pour cent du fond diffus de haute énergie provient du cœur actif des galaxies.

Les astrophysiciens pensent que les sources de rayons X de haute énergie au centre des galaxies sont les mêmes que les sources de rayons X de basse énergie, mais observées sous des angles différents. La matière qui entoure les trous noirs est répartie sur un anneau et absorbe les rayons X de basse énergie : vu à travers cet anneau, les cœurs brillants seraient des sources de rayons X de haute énergie, mais observés « de dessus », ils constitueraient des sources de faible énergie.

L'origine d'une fraction du rayonnement diffus reste mystérieuse. Il provient sans doute de sources ponctuelles de faible intensité dont XMM-Newton révèle peut-être la présence, lorsqu'il fera des observations plus longues, dans la direction du pointé de Lockman.

Le puffin cendré

L'analyse de la disparition annoncée, mais évitée, d'une population d'oiseaux

Pour respecter la tradition, une vingtaine d'habitants des îles Madères s'embarquent, chaque automne, pour les îles Salvages, situées à 100 kilomètres au Sud de Madère. Ils prélèvent environ 25 000 poussins de puffins cendrés dont ils apprécient la chair et dont ils utilisent les plumes pour fabriquer des fleurs artificielles et des édredons ; le contenu stomacal gras des poussins est, en outre, réputé excellent pour le nettoyage des cuivres.

Jusque dans les années 1960, la population de puffins restait stable : elle était estimée à quelque 200 000 oiseaux. Puis la population a commencé à s'effondrer. À partir de 1968, Christian Jouanin, Francis Roux et Jean-Louis Mougin, du Muséum national d'histoire naturelle, ont entrepris d'étudier la démographie et les mœurs de ces oiseaux (un mètre d'envergure pour un poids d'environ un kilogramme), afin d'expliquer le déclin de cette population. Simultanément, des mesures de protection étaient prises pour la sauvegarde des derniers individus

Pendant plus de 20 ans, les trois ornithologistes ont bagué des milliers de poussins et d'adultes, et marqué environ 500 nids dont tous les occupants étaient identifiés. Grâce aux milliers de données recueillies, on connaît aujourd'hui la plupart des aspects de la biologie de ces oiseaux. Ils commencent à se reproduire vers neuf ans. Les adultes passent la quasi-totalité de leur vie au-dessus des flots et ne reviennent à terre que pour se reproduire : chaque année, ils retrouvent le même partenaire et le même nid.

En fin de croissance, les poussins s'envolent en quête de nourriture. Beaucoup ne survivent pas à ce brusque passage du confort à l'autonomie : moins de deux pour cent des œufs donneront un adulte reproducteur, bien que ces oiseaux n'aient guère de prédateurs.

Aujourd'hui que l'on connaît mieux la vie de ces puffins, peut-on expliquer la chute de population observée dans les années 1960 ? L'étude a révélé qu'elle avait été la conséquence d'un prélèvement abusif d'adultes qui s'était ajouté à la récolte habituelle des poussins. Le prélèvement de poussins, parce qu'il diminue la concurrence alimentaire, favorise la survie des pou-

sins épargnés par l'homme. Ainsi la tradition ne menaçait pas l'écosystème, jusqu'au jour où l'homme a commencé à chasser aussi les adultes. Les adultes se reproduisent peu, le début de la période de reproduction est tardif, peu de poussins survivent : l'élimination des adultes reproducteurs a failli faire disparaître l'espèce. Depuis 1975, les îles sont protégées et la population de puffins cendrés est remontée à 30 000 individus, mais aujourd'hui, ils sont menacés par la pêche balangrière : ils se blessent sur les longues lignes munies de nombreux hameçons tirées par les bateaux de pêche.



La mer en éprouvette

On optimise les conditions de «culture» du plancton.

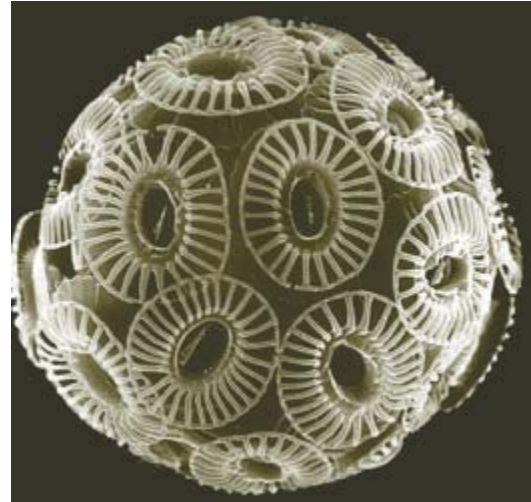
Avoir la main verte dans la culture du plancton ne relève plus de la chance. La croissance du phytoplancton semble dépendre d'une

combinaison complexe, mais, en réalité, elle est surtout fonction de l'éclairement, de la température et des ressources nutritives. Les conditions optimales de la croissance du phytoplancton sont étudiées par Antoine Sciandra et son équipe de la Station zoologique de Villefranche-sur-Mer.

En mer, les courants, le vent et les variations d'ensoleillement, difficiles à mesurer, rendent l'étude de la croissance du phytoplancton quasi impossible. Les biologistes ont donc mis au point un dispositif, une sorte de bioréacteur, où la température, le débit des éléments nutritifs (sels minéraux, nitrates et phosphates) et la luminosité sont précisément contrôlés. Ce «chémostat» automatisé n'est pas une simple marmite, où le plancton se développe jusqu'à épuisement des ressources. Dans ce montage, le chémostat fonctionne en circuit ouvert : il est renouvelé en continu par une eau riche en sels nutritifs qui alimente les organismes phytoplanctoniques

recupérés dans le trop plein, et il est purgé automatiquement de quelques millilitres toutes les 15 minutes. Un compteur laser dénombre les cellules, et mesure leur taille (comprise entre cinq et dix micromètres). On en déduit à quelle biomasse cela correspond. Un colorimètre évalue aussi régulièrement la quantité résiduelle d'éléments nutritifs. D'autres paramètres, telle la teneur en azote, sont déterminés d'après les mesures réalisées sur le chémostat et d'après des modèles de croissance du plancton. Ces «capteurs logiciels» ont été mis au point avec l'équipe de Jean-Luc Gouzé de l'INRIA, l'Institut national de recherche en informatique et en automatique. Au bout de quelques heures, la biomasse et le surplus nutritif ne varient plus, car le milieu a atteint un état d'équilibre. On modifie alors l'un des paramètres, la température par exemple, pour perturber l'équilibre et suivre son évolution. Cette transition correspond à l'adaptation du plancton aux conditions variables qu'il subit en mer.

Les biologistes ont ainsi établi les conditions optimales de croissance de cinq espèces de plancton parmi les quelque 3 000 répertoriées. Ces informations seront utiles pour l'optimisation de la production du phytoplancton dans les bassins d'aquaculture : il est si difficile à récolter en mer qu'il est plus rentable de le «cultiver». Il sert à l'alimentation des poissons d'aquaculture et on en extrait des produits utili-



La membrane d'*Emiliana huxleyi* (cinq micromètres de diamètre) est couverte de petites structures en carbonate de calcium qui sédimentent au fond de l'océan après la mort du micro-organisme.

sés dans l'industrie alimentaire et pharmaceutique.

Enfin, les biologistes cherchent à estimer l'impact de l'augmentation dans l'atmosphère du dioxyde de carbone sur la biomasse marine : les océans absorbent de grandes quantités de dioxyde de carbone, qui est assimilé et transformé par le plancton. Ainsi, *Emiliana huxleyi* fabrique en métabolisant le dioxyde de carbone atmosphérique, des minuscules «carapaces» de carbonate de calcium qui s'accumulent au fond des océans. Pourrait-on envisager d'utiliser le phytoplancton pour piéger davantage de dioxyde de carbone et lutter ainsi contre l'effet de serre ?

La vigne du Collège

La vigne du Collège de France a-t-elle sauvé le vignoble français du phylloxéra ?

L'histoire de la vigne qui continue de prospérer sur la façade d'une cour intérieure du Collège de France appartient au folklore du célèbre éta-

blissement. Question : cette vigne est-elle historique ? Est-elle, comme l'affirme une rumeur persistante, le premier plant américain, résistant au phylloxéra, qui a sauvé le vignoble français, au XIX^e siècle ?

Le fléau du phylloxera apparut pour la première fois en France en 1864. Les vignes dépérissaient inexorablement, mais on en ignorait la cause. L'insecte reconnu coupable de cette catastrophe ne fut identifié qu'en 1868. Avant d'atteindre sa forme ailée, le phylloxéra, un minuscule puceron, se développe sur les racines de la vigne et s'en nourrit jusqu'à la mort de la plante. En 1874, le tiers du vignoble français avait disparu. Grâce à l'utilisation, comme porte-greffe, de plans

américains qui résistaient aux attaques de l'insecte, la reconstitution du vignoble commença en 1880. Elle ne fut complète qu'après la Première Guerre mondiale.

Quel rôle jouèrent les professeurs du Collège de France dans ce long combat ? Il existe, aux archives de l'institution, trois photographies anciennes de la vigne historique. Une légende collée sous ces deux premières est sans équivoque : «Cep de vigne américain, le premier qui ait été planté en France lors de l'invasion du phylloxéra. Planté en 1874 par Balbiani et a servi aux expériences de ce savant et de son collaborateur Hennequy, dont les travaux ont grandement contribué à sauver le vignoble français.» Édouard Balbiani (1825-1899) et Félix Hennequy (1850-1928) ont tous les deux été professeurs d'«embryogénie» comparée au Collège de France, le premier de 1874 à 1899, et le second de 1900 à 1928.

La troisième photographie porte une annotation un peu différente : «Vigne américaine (côté Ouest de la cour) *Vitis lamproscarpa* plantée par Hennequy.» Ainsi, il y eut au moins deux vignes «historiques» du Collège de France, et la vigne Est, à l'emplacement de la seule qui subsiste,

était d'origine française. La vigne américaine qui était plantée dans la partie Ouest de la cour, c'est-à-dire du côté de la rue Saint-Jacques, a disparu depuis longtemps. Enfin, on sait que les premiers plants de vigne américains furent introduits dans le Bordelais dès 1840, bien avant Hennequy et Balbiani. Ce sont même ces plans qui apportèrent en France le dangereux puceron. Bien plus tard, on s'aperçut que ces vignes infectantes résistaient elles-mêmes au parasite et pouvaient fournir des porte-greffe salvateurs.

Ainsi, il y a de fortes chances pour que la vigne de l'Académie ne soit pas celle qui sauva le vignoble français.

Jean JACQUES



Les termitières, engrais naturels

Les excréments des termites qui se nourrissent d'humus fertilisent les sols tropicaux

Dans les milieux tempérés, on ne compte que cinq espèces de termites, considérés comme nuisibles, car ils rongent le cœur du bois et endommagent les charpentes des maisons. En revanche, dans les milieux tropicaux, on dénombre plus de 2 300 espèces de termites, dont plus de la moitié sont des termites humivores, c'est-à-dire vivant dans le sol et se nourrissant des matières organiques qu'il contient. Plus de 10 000 termites par mètre carré colonisent parfois le sol des forêts. Quel est l'impact de ces insectes sur les écosystèmes tropicaux ? À l'Institut de recherche pour le développement de Dakar, nous avons montré que les termites humivores participent au maintien de la fertilité des sols.

Nous avons mesuré les concentrations en carbone, en azote et en phosphore au voisinage des termitières d'une espèce qui vit dans les savanes arides tropicales du Sénégal (*Cubiterme nikoensis*). Les concentrations en carbone et en azote sont cinq à sept fois supérieures à celles du sol environnant. Les termites mangent le sol, puis le broient dans leur gésier. Le broyat tra-

verse le tube digestif, où il subit une attaque basique (le pH est compris entre 10 et 12). La matière organique du sol est principalement constituée de macromolécules, qui sont dégradées. Les bactéries découpent les protéines dégradées en fragments encore plus petits qui, mélangés à des particules minérales dans les excréments, servent de matériau de construction pour les termitières. C'est là que se concentrent les matières organiques que les termites ont ingérées.

De plus, dans les termitières, les concentrations en bactéries sont dix fois supérieures à la normale, et ces communautés bactériennes sont plus variées que celles du sol des savanes qui les entoure. Ce sol est pauvre en matière organique laquelle est, de surcroît, sous forme de macromolécules que les bactéries ne peuvent pas directement utiliser. Afin de survivre dans ce type de sol, la plupart des bactéries adoptent une forme « dormante ». La seule présence de nourriture, apportée par les vers de terre, dans les milieux tempérés, et par les termites dans les milieux tropicaux, notamment dans les savanes arides, suffit à les « réveiller ».

Ainsi, les termites humivores participent à la fertilisation des sols pauvres et arides des savanes, favorisent le développement de la faune microscopique, piègent la matière organique dans les termitières, la rendant plus accessible aux plantes, et favorisent la résistance des sols à l'érosion et au lessivage : ces insectes ont un rôle bénéfique dans les écosystèmes tropicaux.

Alain BRAUMAN, IRD Sénégal



Une termitière de l'espèce *Cubiterme nikoloensis* dans la savane. Elle mesure environ 50 centimètres de diamètre.

Quand les poissons avaient des dents...

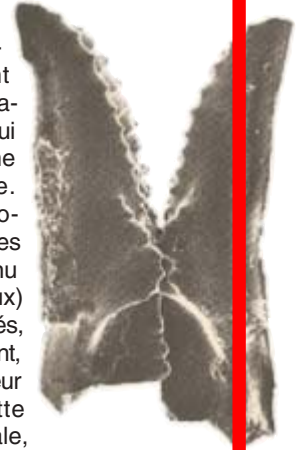
Les conodontes, enfin classés dans la famille des poissons.

Les conodontes sont des petits fossiles phosphatés en forme de denticules âgés d'environ 206 à 500 millions d'années. Grâce à leur

évolution rapide, en les analysant en biostratigraphie, c'est-à-dire qu'ils permettent de dater les roches qui les contiennent. Les conodontes ne sont que des constits isolés d'organismes que mangeaient des animaux plus imposants. À qui appartenaient ces denticules ? Trois paléontologues britanniques, Peter Donoghue, Philip Forey et Richard Aldridge ont déterminé les liens de parenté des conodontes en rassemblant toutes les connaissances déjà acquises.

Au fil du temps, on les a affiliés à toutes les branches de l'arbre de l'évolution. Puis, dans les années 1980, on a découvert que les conodontes formaient l'appareil masticateur d'un animal qui ressemblait à une petite anguille. Ainsi, les conodontes (le nom des fossiles est devenu celui des animaux) étaient des chordés, des animaux qui ont, à un moment de leur vie, une baguette squelettique axiale, au-dessus du tube digestif. Ils avaient deux gros yeux, des poches branchiales, une musculature du tronc développée, une notochorde, ancêtre de la colonne vertébrale ainsi qu'une nageoire caudale. Toutefois, les chordés représentent un vaste ensemble comprenant les tuniciers, les myxines et les lamproies (les seuls poissons actuels sans mâchoires), ainsi que tous les autres vertébrés ; la place des conodontes au sein de cet ensemble demeurait imprécise, malgré la découverte de nouveaux spécimens complets. Pourquoi la question préoccupe-t-elle les paléontologues ? Si les conodontes sont de vrais vertébrés, leur appareil masticateur pourvu de dents expliquerait l'origine de certains os et des dents.

Cette étude repose sur une analyse cladistique, une méthode qui regroupe



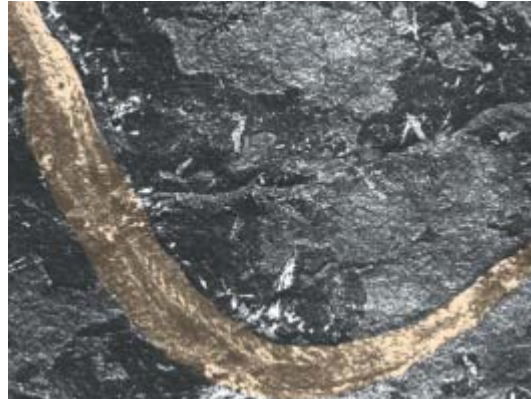
Dents de conodontes (1,2 millimètre de hauteur)

es organismes selon la distribution la plus parcimonieuse de leurs caractères évolués. L'équipe britannique a comparé toutes les données accumulées sur ordi- nateur, puis a confronté les résultats aux concepts et théories existants. Leur conclu- sion est sans appel : les conodontes sont les plus proches des poissons sans mâchoire fossiles et des vertébrés à mâchoire qu'ils ne le sont des actuelles lampiroies et myxines. Ils sont donc plus évolués qu'on ne le supposait et peuvent être considérés comme de vrais poissons. Une des consé-

quences de cette découverte est que les constituants des denticules, l'émail et la dentine, sont probablement communs aux conodontes et aux vertébrés plus évolués. Ainsi, de façon un peu schématique et à l'inverse du modèle généralement admis, le squelette superficiel des poissons, les os dermiques et les écailles seraient dérivés d'éléments utiles à la nutrition : certains os du crâne, carapaces et autres écailles des vertébrés dériveraient... de dents.

Lionel CAVIN

Musée des Dinosauriens - Espéraza



Un conodonte (36 millimètres de longueur), l'ancêtre des anguilles, notamment, dont les dents servent à dater des fossiles.

Nouvelles armes contre le paludisme

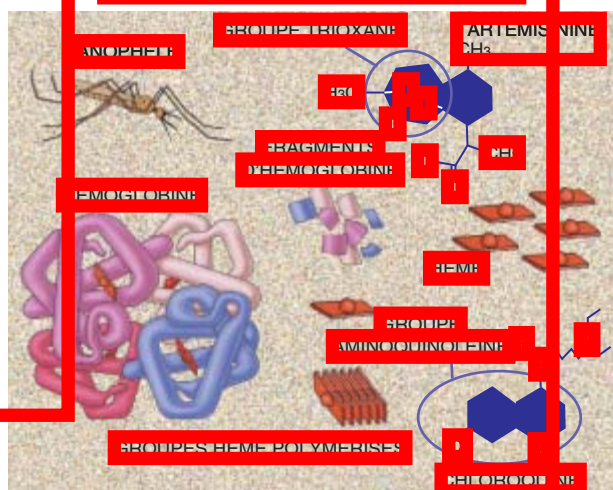
Des molécules constituées de deux sous-unités actives sur une même cible ont été synthétisées.

Le paludisme reste un fléau qui touche des centaines de millions de personnes dans le monde et fait deux millions de victimes par an, essentiellement dans les pays en développement. C'est la troisième cause de décès par infection après la tuberculose et le SIDA. De surcroît, la maladie est en expansion parce que le parasite résiste de plus en plus aux substances antipaludiques classiques et que les insectes vecteurs de la maladie échappent de plus en plus aux insecticides. Enfin, en raison du réchauffement de la planète, des régions jusqu'alors épargnées, tels le Sud de l'Europe et des États-Unis, risquent d'être touchées d'ici 10 à 12 ans. Cette évolution aura peut-être pour conséquence que les pays riches, se sentant davantage concernés, investiront plus de moyens pour mettre au point de nouveaux traitements. Une nouvelle classe de molécules est en cours d'élaboration par Bernard Meunier, Anne Robert et leurs collègues du Laboratoire de chimie de coordination du CNRS, à Toulouse. Les nouvelles molécules agissent sur les souches résistantes aux molécules antipaludiques classiques.

La maladie est due à un parasite du genre *Plasmodium*, et le plus dangereux est *Plasmodium falciparum*. Le parasite est injecté à l'homme, sous forme d'un sporozoïte, par la piqûre d'un moustique Anophèle femelle contaminé. Les sporozoïtes se réfugient d'abord dans le foie où ils se développent avant de se répandre sous

forme de mérozoïtes dans l'organisme. Ces derniers envahissent les globules rouges où ils se multiplient. Les globules rouges finissent par exploser sous l'effet de la pression exercée par ces innombrables parasites. Ces destructions massives de globules rouges correspondent aux épisodes fébriles qui accompagnent la maladie et qui surviennent environ toutes les 48 heures. Quelques mérozoïtes se transforment en gamétocytes qu'un nouveau moustique vecteur absorbe lorsqu'il pique une personne contaminée. Et le cycle infectieux continue.

Pour se multiplier, le parasite a besoin de protéines. Où trouve-t-il la «matière première» pour les fabriquer ? Il découpe l'hémoglobine de la personne infectée et se sert des maillons constitutifs de cette protéine pour reconstruire ses propres protéines. Toutefois, à chaque stratégie gagnante s'oppose souvent une contre-attaque de l'organisme menacé : lorsque la chaîne d'hémoglobine est découpée, il reste un résidu, l'hème, que le parasite n'utilise pas, mais qui est dangereux.



le moustique anophèle, vecteur du paludisme, découpe les maillons de l'hémoglobine de la personne infectée. Il y prélève les éléments nécessaires à la fabrication de ses propres protéines. Pour se défendre contre le résidu hème qui produit des réactions oxydantes pour le parasite, ce dernier en déclenche la polymérisation, que le pouvoir oxydant de l'hème est inhibé. L'artémisinine et la quinine empêchent cette polymérisation : l'hème libre détruit les cellules infectées.

peut déclencher un stress oxydatif mortel pour le parasite. Nouvelle riposte du parasite : il parvient à déclencher la polymérisation des résidus hème, qui une fois assemblés perdent leurs propriétés oxydantes. L'homme riposte à son tour en empêchant cette polymérisation.

C'est précisément le mode d'action des médicaments antipaludiques : ils empêchent la polymérisation de l'hème. La chloroquine, substance apparentée à la quinine extraite de l'écorce de quinquina, empêche cette polymérisation grâce à un motif aminoquinoléine. Une autre substance antipaludique, l'artémisinine agit par un motif trioxane. Depuis quelques années, B. Meunier et ses collègues s'intéressent à l'artémisinine : des extraits de feuilles de cette armoise sont utilisés dans la médecine traditionnelle chinoise pour traiter les crises de paludisme. Toutefois, le rendement d'extraction du principe actif est faible et sa synthèse chimique coûteuse.

Etant donné que la chloroquine a été efficace, mais que certaines souches de parasites lui échappent et que l'artémisinine est également efficace mais difficile à extraire et à synthétiser, l'équipe de Toulouse a eu l'idée d'assembler en une même molécule les deux groupes qui empêchent la polymérisation de l'hème. Ils ont ainsi élaboré une nouvelle classe de molécules à «deux têtes», les trioxaquinones qui contiennent à la fois un groupe trioxane et un groupe aminoquinoléine. Dans ces molécules chimiques, on constate une synergie entre le groupe actif de la chloroquine qui pénètre facilement dans les globules rouges et celui de l'artémisinine qui a une activité élevée sur les souches résistant à la chloroquine. Ces molécules ne sont activées que par l'hème libre de sorte que même si elles pénètrent dans tous les globules rouges, elles n'agissent que dans les cellules infectées.

L'harmonie des cœurs d'atomes

PHILIPPE CHOMAZ • YORICK BLUMENFELD • JEAN-ANTOINE SCARPACI

A la fois élastiques et rigides, les noyaux des atomes sont des ressorts microscopiques : ils vibrent et entrent en résonance. Postulées depuis 50 ans, ces résonances viennent d'être observées.

Tout vibre autour de nous : les ressorts, les balançoires, les tambours, l'air, la surface des mers... Même la Terre et le Soleil ! Dans l'univers, la résonance règne en maître. Les poussières, les gouttelettes, les agrégats métalliques et les molécules présentent toutes sortes de vibrations. Les noyaux atomiques sont les plus petits oscillateurs connus aujourd'hui. Ils sont composés de nucléons : les protons et les neutrons. Soumis à des forces extérieures, les nucléons se mettent en mouvement : ils oscillent de façon cohérente, c'est-à-dire qu'ils se déplacent de façon organisée et périodique.

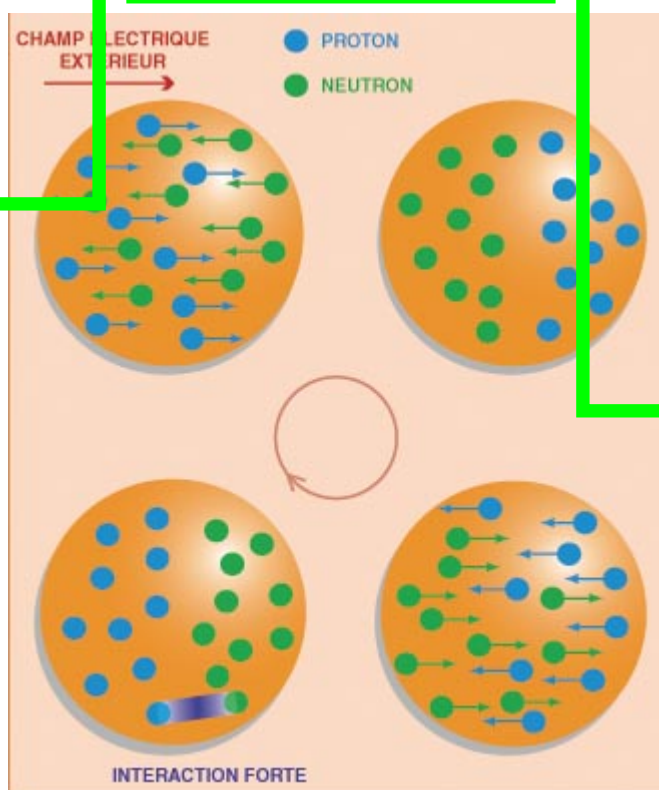
Ces va-et-vient collectifs des nucléons donnent au noyau des mouvements de vibration simples. Par exemple, il se contracte et se dilate en rythme, comme un cœur minuscule qui battrait. Du il s'allonge en cigare puis s'aplatit comme une crêpe, ou encore il passe de sa forme sphérique à une forme de poire, puis reprend sa forme initiale, etc. Peu à peu, des vibrations d'une grande variété de formes ont été découvertes. Elles sont nommées résonances géantes, car elles engendrent des signaux intenses.

En 1947, les Américains G. Baldwin et G. Klaiber ont découvert les premières vibrations des

noyaux atomiques. Ils avaient irradié des éléments lourds avec des rayons gamma, des photons de très haute énergie (plusieurs dizaines de millions d'électronvolts). À une fréquence particulière, ces rayons gamma sont fortement absorbés, ce qui indique que le noyau entre en résonance avec les ondes électromagnétiques. Ce phénomène est analogue à la résonance du pont suspendu de Tacoma, aux États-Unis

en 1940. La cadence des rafales du vent coïncidait ce jour-là avec la période des oscillations du pont. Il commença à onduler et, l'amplitude des mouvements ne cessant d'augmenter, il finit par se rompre.

L'expérience de G. Baldwin et G. Klaiber fut interprétée dès 1948 : les neutrons, sans charge, ne sont pas sensibles au champ électromagnétique de l'onde gamma. En revanche, les protons, chargés, sont entraînés par la composante électrique de ce champ et se mettent en mouvement. Observés à partir du centre de masse du noyau, les neutrons paraissent se déplacer dans la direction opposée à celle des protons. Quand la fréquence de l'onde est égale à celle de la vibration naturelle des protons par rapport aux neutrons, le noyau entre en résonance ; on parle alors de résonance géante.



L. LA RÉSONANCE DIPOLAIRE fut la première résonance géante découverte. Les protons (en bleu) oscillent en opposition de phase avec les neutrons (en vert).

Des oscillateurs microscopiques

L'interaction forte intervient alors. C'est l'une des quatre interactions élémentaires fondamentales. Elle lie les nucléons entre eux et joue ici un rôle identique à la force de rappel dans un ressort, en exerçant une force d'attraction entre protons et neutrons. Elle les ralentit, les immobilise, puis les repousse en sens inverse

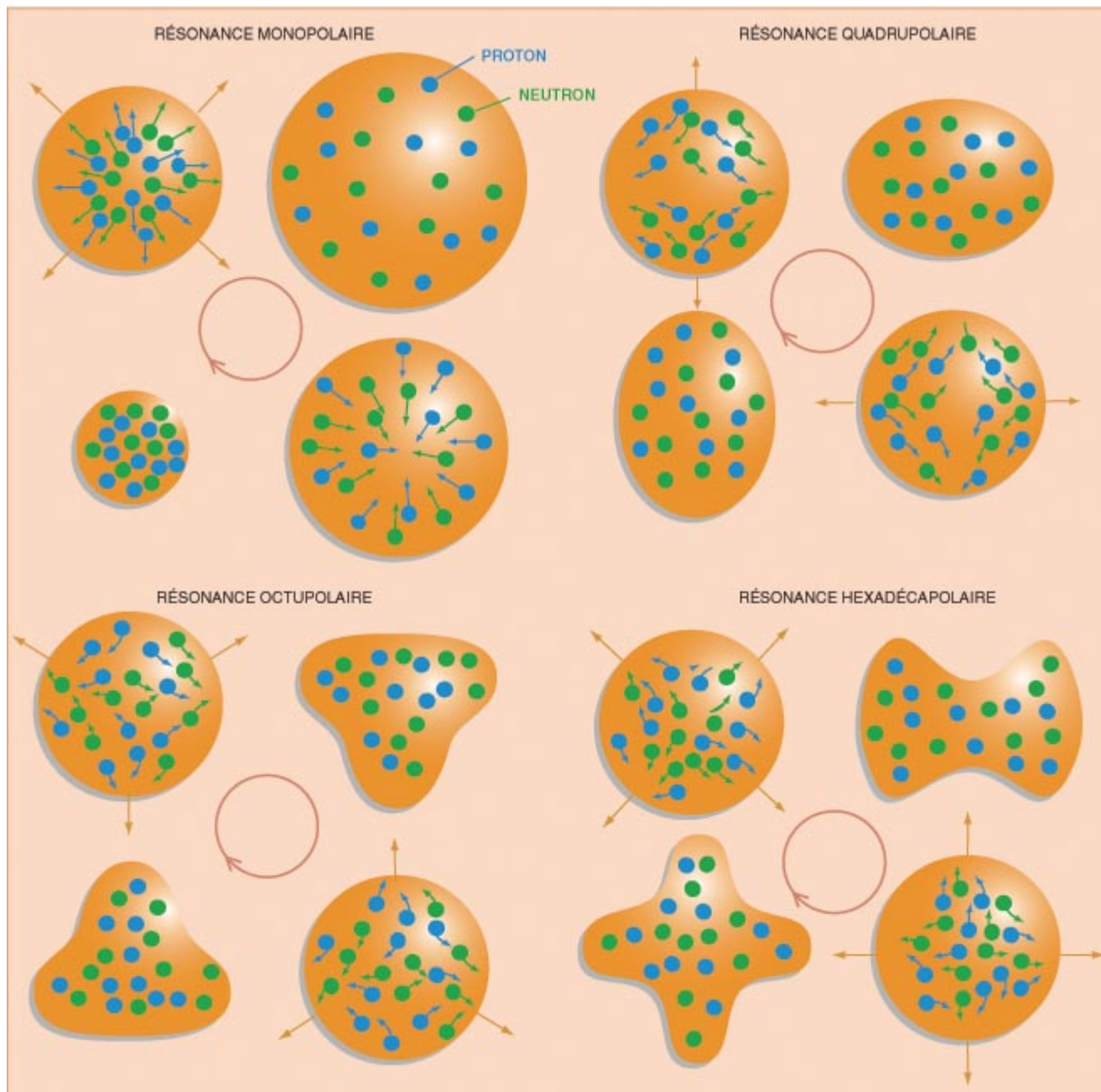
Les nucléons se croisent et oscillent en opposition de phase (voir la figure 1). Cette résonance, la première découverte, a été nommée «résonance dipolaire géante». Contrairement aux résonances découvertes depuis, elle ne déforme pas le noyau (voir la figure 2). La résonance monopolaire est celle qui ressemble à un cœur qui bat, comprime, puis gonfle le noyau. Lors de cette résonance, les nucléons se déplacent ensemble : ils convergent d'abord vers le centre du noyau, puis s'en éloignent, ce qui fait varier leur

densité. Résultat : le noyau semble respirer, la force de rappel étant ici la résistance de la matière à la compression et à la dilatation.

Dans d'autres modes, dits de surface, la répartition des nucléons change mais pas leur densité. Le noyau se déforme comme la surface de l'eau plissée par les vagues. La plus simple oscillation de surface est le mode quadrupolaire : le noyau s'allonge vers le haut, puis s'aplatit. Dans ce mode, comme pour le mode monopolaire, les protons et les neutrons se déplacent de

la même manière, mais ils ne se croisent pas. Ici, ils se dirigent ensemble, non plus vers le centre, mais vers deux bords opposés du noyau, ce qui le rend ellipsoïdal.

Dans toutes les résonances géantes, les fréquences de résonance sont très élevées. En effet, le noyau ressemble à un minuscule ressort très dur, car la force qui lie les protons et les neutrons est considérable (plusieurs milliers de newtons). Or, plus un ressort est dur, plus sa force de rappel est élevée, plus il vibre à hautes fréquences. De même, plus il est petit, plus sa fréquence de



2. LES NOYAUX, sous l'influence des mouvements collectifs des nucléons entrent en collision. Tous peuvent vibrer selon des modes de résonance variés. Parmi les plus caractéristiques : le mode monopolaire correspond à une série de compressions et d'expansion des protons

(en bleu) et des neutrons (en vert) ; en mode quadrupolaire, le noyau s'allonge et s'aplatit alternativement. Dans le mode octupolaire le noyau prend une forme de poire et dans le mode hexadécapolaire, par exemple, le noyau passe d'une forme de bobine à une forme d'étoile

vibration est élevée. Ainsi, les fréquences des résonances géantes atteignent 10^{22} hertz, soit 64 octaves au-dessus du «la» du diapason. L'énergie minimale pour exciter une résonance est égale à cette fréquence multipliée par la constante de Planck, soit entre 10 eV et 20 millions d'électronvolts.

Mettre un noyau en vibration

Trois méthodes existent pour faire vibrer un noyau atomique (voir la figure 3). La première consiste à le plonger dans un champ électromagnétique externe oscillant. C'est ainsi qu'est excitée la résonance géante dipolaire. Dès que la fréquence du champ est égale à la pulsation de la résonance, les photons sont absorbés par le noyau, ce qui met les protons en mouvement et déclenche la vibration du noyau.

Dans la deuxième méthode, dite «échange de charge», un faisceau incident, constitué de particules chargées, bombarde les noyaux que l'on étudie. Une particule du faisceau incident pénètre dans le noyau et y dépose une

charge positive, par exemple, qui transforme un des neutrons en un proton. Cette opération crée un déséquilibre des charges dans le noyau. Les protons et les neutrons se mettent alors en mouvement. Les résonances induites sont analogues à celles excitées par des champs électromagnétiques.

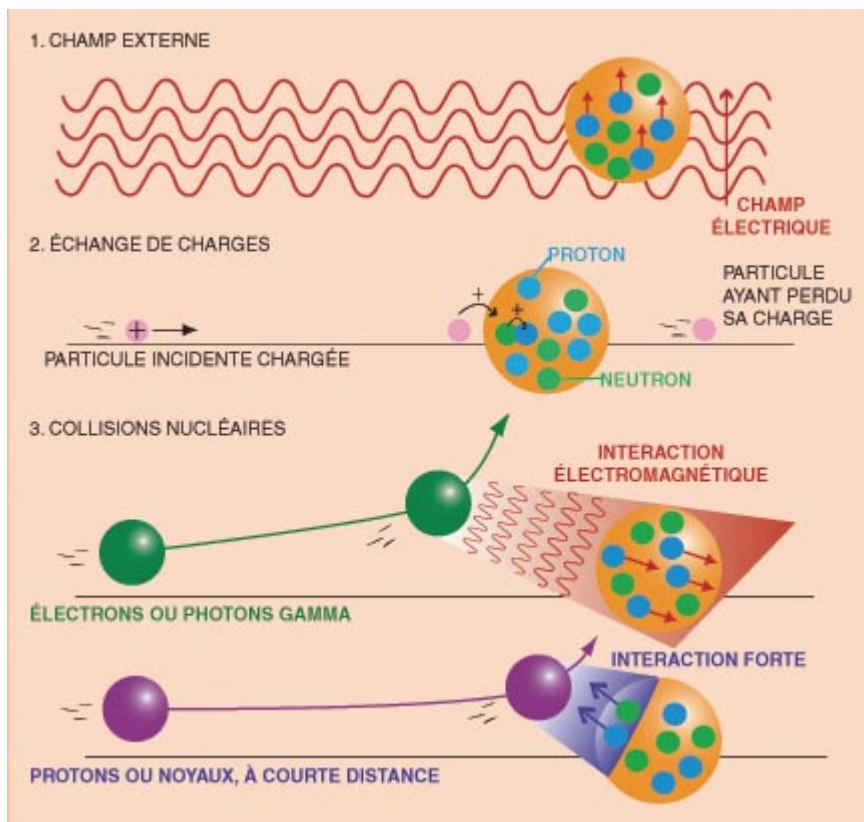
La dernière méthode, la plus employée, consiste à bombarder le noyau avec des projectiles, tels des électrons, des nucléons ou des noyaux, pour provoquer une collision. Cela revient à lancer des billes pour déclencher le mouvement d'un ressort ou la vibration d'une cloche : il faut viser juste. Si la collision est trop violente, le noyau se brise. Il ne peut plus vibrer. Plus question qu'il vibre. Le projectile doit seulement effleurer le noyau. Cela suffit à le faire vibrer, car les projectiles n'ont pas d'action mécanique, mais agissent par l'intermédiaire d'un champ électromagnétique ou de l'interaction forte. L'interaction électromagnétique agit à longue distance. L'interaction forte n'est possible qu'avec les protons, les particules alpha (noyaux d'hélium

et autres noyaux. A courte distance elle domine l'interaction coulombienne et agit indépendamment de la charge : elle s'applique de façon symétrique sur les protons et les neutrons, qui lui apparaissent comme des niveaux quasi identiques. Dans ce cas, la «collision» nucléaire excite principalement les résonances où protons et neutrons vibrent ensemble comme les résonances monopolaires et quadrupolaires. Ainsi, suivant sa vitesse et sa nature, le projectile provoque différentes résonances qui se superposent ; un peu comme lorsqu'on tape sur une cymbale, qui produit alors plusieurs sons. Après la collision, le projectile est dévié et il a perdu une partie de son énergie, qui a été transférée au noyau. En pratique, on mesure cette énergie pour déterminer l'énergie de la résonance (voir l'encadré de la page 37).

Si les électrons et les protons sont des projectiles considérés comme des billes, on bombarde aussi les noyaux avec des boules. Ces boules, ce sont des ions lourds dont l'utilisation a engendré des progrès notables à partir des années 1980. Les ions lourds sont des atomes lourds ionisés. Leur noyau est composé d'un grand nombre de protons et de neutrons. Par conséquent, les forces électromagnétiques et nucléaires qu'ils font subir au noyau cible sont plus élevées que celles qu'exerce un simple proton. La probabilité d'excitation des résonances géantes est donc beaucoup plus importante, ce qui facilite leur étude.

Système complexe auto-organisé

Que se passe-t-il lors d'une résonance géante? Dans le noyau à l'équilibre les nucléons n'occupent pas, d'après le principe d'incertitude d'Heisenberg, une position précise. On calcule d'après l'ordre de grandeur de l'interaction forte entre les nucléons (plusieurs millions d'électronvolts) et de leur masse, qu'un nucléon a une vitesse égale au tiers de celle de la lumière et que chaque proton et neutron occupe le noyau entier. Il interagit donc avec tous les autres nucléons et subit une force moyenne exercée par l'ensemble des particules. Ces forces moyennes sont à l'origine d'un champ, nommé potentiel nucléaire moyen.



3. COMMENT METTRE UN NOYAU EN VIBRATION? Le plonger dans un champ électromagnétique (1), lui donner ou lui retirer une charge (2), ou provoquer une collision nucléaire (3). Dans ce cas, les ions lourds utilisés comme projectiles sont les plus efficaces. Ils agissent à la fois par interaction électromagnétique et par l'interaction forte, selon leur nature et la distance avec le noyau cible.

Le potentiel nucléaire moyen dépend de la répartition des nucléons. Lorsqu'on applique une force extérieure pendant un court instant, la position moyenne des nucléons est modifiée, et le potentiel nucléaire moyen se réajuste rapidement. Dès lors, il modifie aussi le mouvement des nucléons, ce qui fait varier le potentiel et ainsi de suite. Le potentiel nucléaire moyen tend ainsi à ramener les nucléons dans leur position d'origine et les fait osciller autour de celle-ci. C'est lui qui joue le rôle de la force de rappel du ressort (voir la figure 5).

Plus précisément, dans le noyau à l'état fondamental, les protons et les neutrons s'ordonnent sur les niveaux d'énergie du potentiel nucléaire moyen, à l'instar des électrons sur les orbitales atomiques. Chaque niveau comporte un nombre restreint d'états suivant le principe d'exclusion de Pauli, deux nucléons ne peuvent occuper le même état. Dans un noyau à l'état fondamental, les états de plus basse énergie sont tous remplis jusqu'à un niveau nommé niveau de

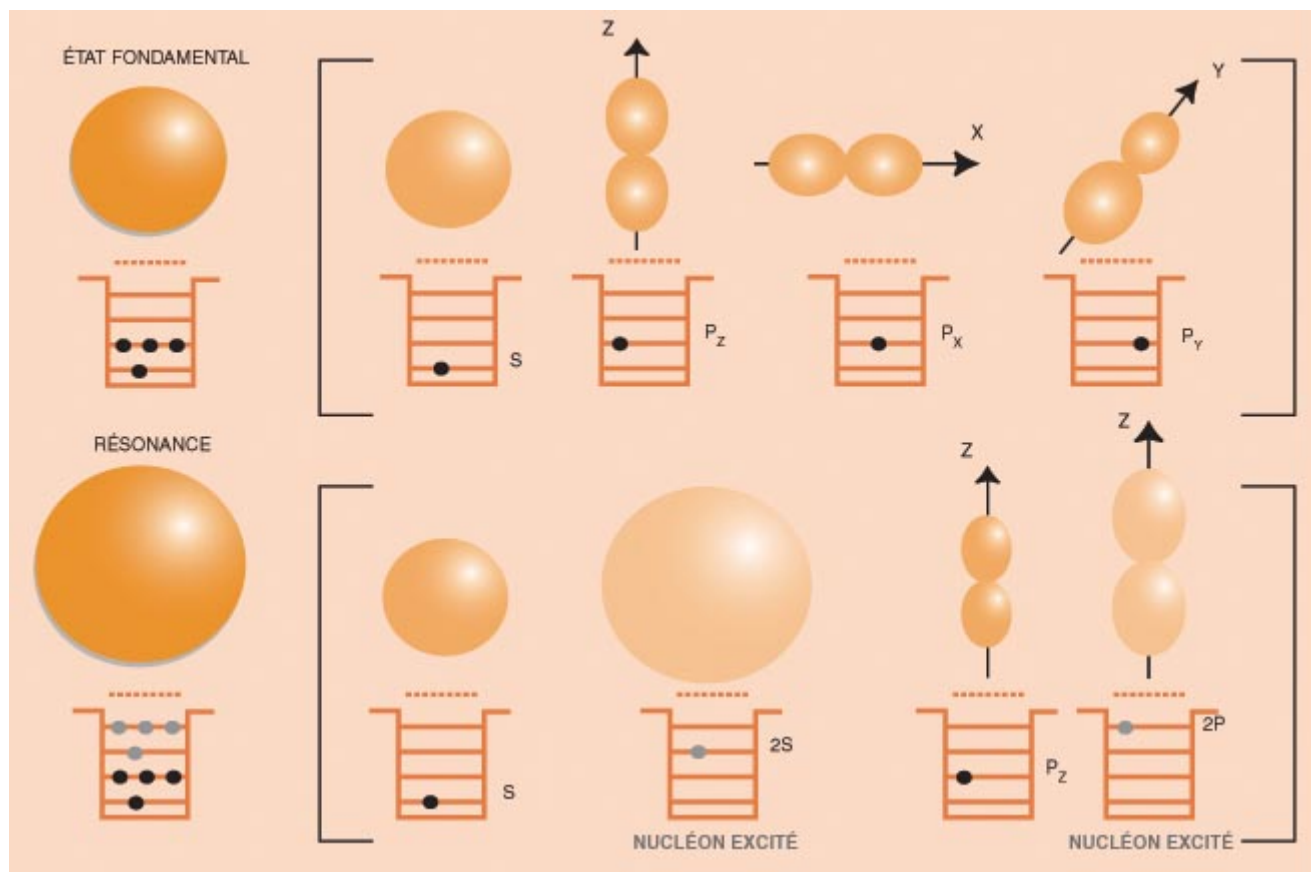
fermi. Quand un nucléon est sur un niveau défini, il occupe un nuage qui représente une distribution de probabilité de présence, et ce nuage est immobile. Tous les nuages sont imbriqués dans le noyau à l'état fondamental : il ne vibre pas.

Lorsqu'on provoque une collision ou qu'on applique un champ, on apporte de l'énergie au noyau. Elle est utilisée par un nucléon pour quitter son niveau et sauter sur un niveau vacant. Le nucléon qui a changé de niveau laisse derrière lui un trou dans la mer des états occupés. Ce passage est nommé «excitation particule-trou». Chaque nucléon a une probabilité de passer d'un niveau occupé à un niveau vide. Il est à la fois sur deux niveaux d'un point de vue quantique. Cette superposition des excitations microscopiques particule-trou, engendre les mouvements des nucléons : les nuages ne sont plus immobiles. Par conséquent, le noyau vibre (voir la figure 4). Une résonance est caractérisée par le mélange d'excitations particule-trou qui la provoque.

Les empreintes d'une géante

Une fois la résonance déclenchée, le noyau ne vibre pas éternellement. Les noyaux oscillent avec des amplitudes de plus en plus faibles, et la résonance finit par s'amortir, au bout d'un temps, de l'ordre de 10^{-20} seconde. Cette décroissance provient de l'émission d'un nucléon hors du noyau. Dès lors, le noyau retourne vers son équilibre et la vibration disparaît. Cette particule provient d'une des excitations particule-trou qui constituent la résonance. On mesure l'énergie du nucléon émis (voir l'encadré de la page 37) et on en déduit l'énergie du trou associé. En général, le nucléon éjecté peut provenir de plusieurs orbitales, avec des probabilités différentes, et donc être associé à plusieurs trous sur des orbitales déterminées. Ces trous sont caractéristiques de la nature d'une résonance pour un noyau donné et constituent, en quelque sorte, ses empreintes digitales.

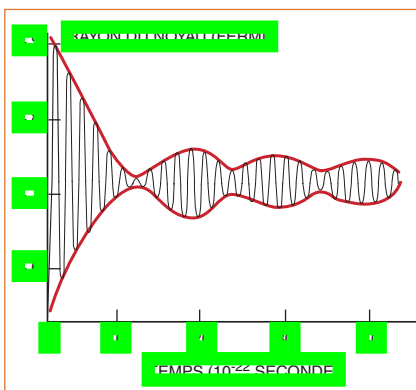
Par exemple, au GANIL (Grand accélérateur national d'ions lourds), à Caen



1. LE NOYAU DANS SON ETAT FONDAMENTAL (ici l'oxygène 16) : les nucléons occupent l'orbitale sphérique s et les orbitales à deux lobes p, orientées dans les directions x, y et z. Dans l'état excité (résonance), un nucléon passe de son niveau occupé à un état vide : un trou apparaît dans les états initialement occupés. Ce nucléon pro-

vient de l'orbitale s ou des orbitales p (seule l'orbitale p dans la direction z est représentée sur la figure). L'état du noyau en résonance est la superposition de toutes les configurations possibles : c'est-à-dire de toutes les excitations particule-trou. Cette superposition engendre les mouvements de vibration macroscopique du noyau.

nous venons d'étudier la décroissance de la résonance géante de l'isotope ^{40}Ca du calcium. Une cible de cet élément est bombardée d'ions de calcium. Les noyaux de la cible entrent en résonance quadrupolaire. Chaque noyau en résonance se désexcite en émettant un proton. Les noyaux fils obtenus sont donc des noyaux de potassium. On mesure les énergies des protons de décroissance et on obtient deux pics. Le pro-



5. EVOLUTION DU RAYON D'UN NOYAU INITIALEMENT COMPRIMÉ. Elle est calculée en résolvant l'équation de Schrödinger pour chaque nucléon plongé dans le potentiel nucléaire moyen créé par tous les autres nucléons. Le potentiel tend à ramener les nucléons dans leur position d'origine. Un mouvement d'oscillation autour de cet équilibre apparaît. La figure est caractéristique de battements entre deux oscillations superposées.

on laisse un trou qui peut être sur deux niveaux possibles. Ces deux trous sont caractéristiques de la décroissance directe de la résonance géante quadrupolaire.

Un autre type de dissipation participe à la décroissance des résonances géantes : les collisions entre nucléons (voir la figure 6). Dans leur mouvement oscillatoire, les nucléons entrent en collision les uns avec les autres. Après un choc, les trajectoires des nucléons sont déviées. Le mouvement collectif des nucléons en vibration s'en trouve altéré. Le désordre remplace l'ordre, et l'oscillation disparaît. Le noyau chauffe puis il se refroidit en émettant des particules. Ces émissions aléatoires sont calculées et soustraites aux mesures.

L'énigme des phonons manquants

Tout va pour le mieux dans le monde de l'infiniment petit, régi par la mécanique quantique : les nucléons se répartissent sur des niveaux d'énergie, la résonance provient d'une superposition d'états quantiques et elle s'amortit par émission d'un nucléon. Dans cette représentation, les vibrations du noyau aussi sont bien sûr quantifiées, comme le sont toutes les vibrations, en particulier celles du

champ électromagnétique. Depuis 100 ans, on sait en effet que la lumière apparaît sous forme de grains : les photons. De même, les vibrations des solides apparaissent sous forme de phonons, des «paquets d'énergie de vibration» en quelque sorte.

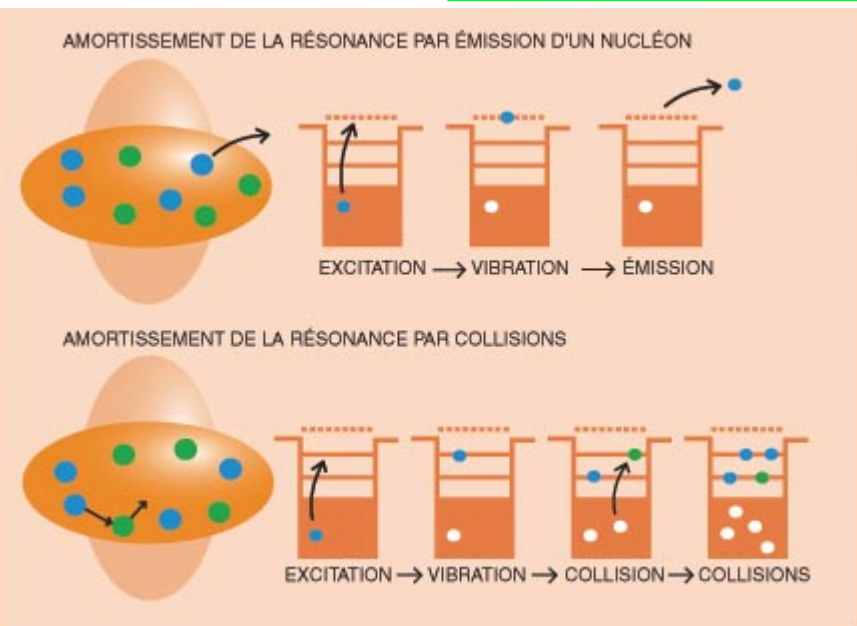
L'existence de phonons dans les noyaux se heurtait, jusqu'à ces dernières années, à deux obstacles : le premier relevait de la théorie. Les nucléons sont des fermions, particules qui ne peuvent occuper simultanément un même état, selon le principe d'exclusion de Pauli. Les phonons, comme les photons, sont des bosons. Or, les bosons sont grégaires : ils tendent à se trouver dans le même état. Un système quantique, composé de plusieurs dizaines de fermions, peut-il s'auto-organiser pour présenter des modes collectifs qui se comportent comme des bosons? Cela semble paradoxal.

La seconde difficulté était d'ordre expérimental. Toutes les résonances géantes, observées jusqu'à présent, étaient des résonances à un phonon. L'énergie du noyau en résonance valait, dans tous les cas, un phonon soit la valeur du «paquet d'énergie de vibration» élémentaire. Les résonances géantes à deux phonons (elles ont les mêmes formes que celles à un phonon, mais leur déformation est plus élevée) n'avaient jamais été observées, ni pour la résonance monopolaire, ni pour aucune autre. Les résonances à «multiphonons», n'ont jamais été détectées non plus. Les physiciens s'étaient-ils trompés? Tant que le deuxième phonon n'est pas observé, ils ne peuvent être certains que les noyaux oscillent vraiment. Ils pourraient tourner, ou avoir n'importe quel mouvement autre qu'une vibration.

Les noyaux vibrent bel et bien, et la preuve a été établie au début des années 1990, grâce à trois expériences qui ont mis sans ambiguïté en évidence les états à deux phonons.

La preuve par trois

Au Gsi (Gesellschaft für Schwerionenforschung), le laboratoire allemand concurrent du GANIL, l'équipe de J. Ritman a entamé, en 1993, une série d'expériences où des projectiles très lourds sont lancés à une vitesse, proche de celle de la lumière. Ces noyaux, fortement chargés, créent sur leur passage des perturbations électromagnétiques d'autant plus fortes que leur vitesse est grande.



6. LA RÉSONANCE S'ATTENUE, soit en éjectant un nucléon, soit par collision des nucléons. Prenons l'exemple de la décroissance de la résonance quadrupolaire géante. Elle se produit quand un proton est éjecté du noyau. Il emporte l'énergie de la résonance et laisse derrière lui un trou. Le noyau perd alors son excitation. La résonance peut aussi s'amortir par collisions entre les nucléons. La collision dévie les nucléons et modifie leur énergie. Elle provoque aussi l'éjection d'un nucléon de son orbitale stable. Il laisse un trou derrière lui. Peu à peu, des états très complexes apparaissent et le mouvement devient désordonné. Ce amortissement chauffe le noyau, qui émet du rayonnement.

Détecter les particules

La première étape dans les expériences de résonance consiste à accélérer les projectiles par des champs électriques. Ces projectiles, des ions positifs, sont dirigés par des champs magnétiques. L'accélérateur du GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds) à Caen, est constitué de plusieurs cyclotrons qui confèrent aux projectiles une vitesse allant jusqu'à la moitié de celle de la lumière. Puis les projectiles sont dirigés vers la cible.

Lors d'une collision peu violente, les noyaux vibrent. Pour mettre en évidence les résonances géantes, on mesure la perte d'énergie du projectile après collision avec une précision supérieure à 1/10 000. Une telle précision nécessite l'utilisation d'un spectromètre magnétique à perte d'énergie ou Speg (voir la figure ci-contre). Un aimant d'analyse disperse le faisceau incident avant la cible. Les ions les plus rapides sont moins déviés et se retrouvent à l'extérieur du virage imposé par l'aimant. Après la cible, un deuxième aimant, dit de focalisation, dévie à nouveau les particules diffusées. Les particules les plus énergétiques étant à l'extérieur de la trajectoire, elles traversent une partie plus longue de ce deuxième aimant et sont donc plus déviées. À l'inverse, les particules initialement moins énergétiques traversent une partie plus courte de l'aimant de focalisation et sont moins déviées. Toutes les particules, quelle que soit leur énergie initiale, se croisent dans un plan focal. L'équivalent optique de ces deux aimants est un objectif photographique. Tous deux sont dit achromatiques, car le plan de focalisation ne dépend pas de l'énergie de la lumière, c'est-à-dire de sa longueur d'onde.

En l'absence de cible, le plan focal arrête toutes les particules du faisceau incident en un seul point. Une fois la cible en place, les noyaux projectiles perdent de l'énergie dans les collisions avec les noyaux cibles. Alors, ils sont plus déviés par le deuxième aimant et sont focalisés dans le plan focal à une position différente, qui nous renseigne sur la perte d'énergie cinétique du noyau projectile selon sur l'énergie communiquée à la cible. L'énergie, la largeur et le type de résonances géantes excitées sont déterminés ainsi. Pour les caractériser avec plus de précision, nous étudions leur décroissance à l'aide de multidétecteurs.

Les résonances géantes s'atténuent par émission de protons ou de neutrons. Or des nucléons sont émis en abondance lors de multiples réactions nucléaires qui accompagnent une résonance géante. Il faut donc détecter à la fois le projectile responsable de la résonance et les nucléons de décroissance de cette résonance.

Pour détecter les nucléons de décroissance, les chercheurs travaillant au GANIL ont construit Pacha et Indra, destinés à la détection des protons et autres particules chargées, Eden et Demon conçus pour la détection de neutrons.

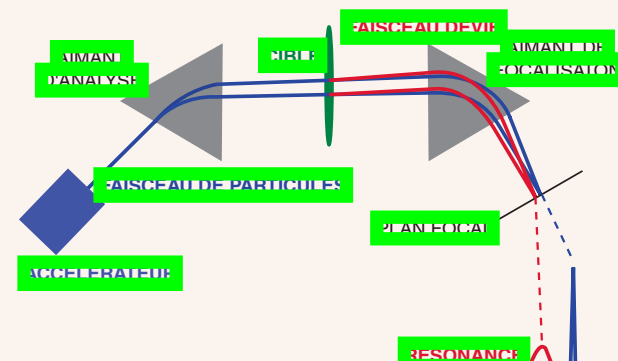
Dans le détecteur *Pacha*, 50 cristaux scintillants d'iodure de césium sont couplés à des photomultiplicateurs qui transforment le signal lumineux en impulsion électrique. La particule détectée est arrêtée dans le cristal et transfère son énergie en excitant les atomes environnants. Ces atomes excités émettent à leur tour de la lumière, convertie en électrons par la photocathode du photomultiplicateur. La spécificité de l'iodure de césium est d'émettre deux composantes de lumière dont le rapport dépend de la nature de la particule détectée. On distingue ainsi les protons des autres particules. Le multidétecteur *Indra* est fondé sur le même principe et possède en outre des détecteurs au silicium ou à gaz. Son avantage? Couvrir toutes les directions possibles. Conçu pour étudier la fragmentation des noyaux, nous l'utilisons aussi pour rechercher le troisième phonon.

Les neutrons n'interagissent avec un détecteur que par la force nucléaire. Leur détection est plus difficile, car cette force est à très courte portée et les neutrons ne perdent pas toute leur énergie lors de l'interaction. On mesure alors le temps qu'ils ont mis pour parcourir la distance entre le noyau cible et le détecteur. On déduit de cette mesure de temps de vol leur vitesse et leur énergie cinétique.

Ainsi, le projectile initial, et les nucléons de décroissance, protons et neutrons, sont caractérisés. On identifie alors sans ambiguïté la résonance du noyau.



La cible contient une très fine feuille d'atomes de calcium. Une fois en place, elle sera bombardée par les particules du faisceau.



Le faisceau de particules issu de l'accélérateur GANIL (sur le schéma à gauche, en bleu) traverse l'aimant d'analyse où chaque particule est déviée en fonction de son énergie. En l'absence de cible, le second aimant (de focalisation) focalise toutes les particules en un point du plan focal. En présence d'une cible, les particules incidentes qui ont déclenché une résonance perdent de l'énergie et sont déviées. Après l'aimant de focalisation, elles convergent en un point différent du point de focalisation des autres particules.

Les champs électriques mettent en mouvement les protons des noyaux, ce qui engendre notamment une forte résonance dipolaire, à la fois des noyaux cibles et des noyaux projectiles.

Les excitations du projectile ont d'abord été étudiées. Une résonance géante dipolaire fut très clairement observée et, au double de cette énergie, une seconde structure, jusqu'alors inconnue, fut aussi mise en évidence. Selon toute vraisemblance, c'était là l'état à deux phonons jamais observé jusqu'alors. Pour s'en assurer, les Allemands ont étudié le noyau cible, lui aussi en résonance. Ils ont mesuré les rayonnements gamma émis par le noyau. Un noyau dans lequel les protons oscillent par rapport aux neutrons se comporte comme une antenne et émet des ondes électromagnétiques. Chaque phonon émet un photon de même énergie que celle de la résonance géante dipolaire. Un état à deux phonons émet donc deux photons d'énergie égale. Des couples de photons de même énergie que celle de la résonance ont en effet été détectés. Les chercheurs venaient de démontrer l'existence de l'état à deux phonons pour la résonance dipolaire.

En 1991, l'équipe américaine de S. Mordechai et F. Moore, de Los Alamos, au Nouveau-Mexique, utilisa la méthode du double échange de

charges, grâce à un faisceau de pions pour exciter les résonances géantes dipolaires à deux phonons. Les pions sont des particules qui existent dans trois états de charge, les pions positifs, les pions négatifs et les pions neutres. Ils peuvent provoquer des échanges de charge simple ou double. Par exemple, quand un pion positif dépose une charge, il devient neutre. Quand il dépose une deuxième charge, il devient négatif. Les spectres d'énergie des noyaux excités de cette façon présentaient une résonance à une énergie double de celle de la résonance géante dipolaire, deuxième preuve de l'existence de l'état à deux phonons dans le mode dipolaire.

Au GANIL, durant la même période nous avons montré l'existence d'une résonance géante quadrupolaire à deux phonons. Nous avons en effet mesuré les énergies des projectiles de calcium après la collision avec les noyaux de la cible. Pour certains, l'énergie perdue valait le double de celle de la résonance à un phonon. Toutefois, pour prouver qu'il s'agit bien d'un état à deux phonons, nous avons étudié la décroissance de la résonance.

Comme nous l'avons vu, une résonance géante est caractérisée par l'énergie des protons de décroissance et la signature des trous possibles dans le

noyau fils. Pour une résonance à un phonon, un seul proton manque. Pour celle à deux phonons, deux protons sont émis, et ainsi de suite, un proton étant associé à chaque quantum. Pour démontrer que la résonance observée a excité deux phonons quadrupolaires, il faut prouver que les noyaux fils gardent les trous caractéristiques de la résonance quadrupolaire. Sur le spectre d'émission des protons, les pics attendus pour la décroissance d'un double phonon apparaissent en effet, ce qui démontre qu'une résonance géante quadrupolaire double a bien été excitée.

Des vibrations d'une étrange harmonie

Ces découvertes confirment l'existence de vibrations collectives dans les noyaux. En outre, la résonance à deux phonons a une énergie double de la résonance à un phonon, avec une précision inférieure à quelques pour cent. Cela signifie que ces vibrations sont harmoniques, c'est-à-dire que la fréquence de la résonance ne varie pas quel que soit le nombre de phonons excités, c'est-à-dire quelle que soit l'amplitude de vibration. L'énergie de résonance à n phonons sera égale à la fréquence de résonance multipliée par n fois la constante de Planck.

Les instruments de musique sont en général, harmoniques. Un piano émet un «la», que l'on joue pianissimo ou fortissimo. En revanche, la fréquence d'un pendule diminue quand l'amplitude de son mouvement augmente : il est anharmonique. L'harmonie des vibrations est inattendue et souligne, encore, les propriétés mécaniques exceptionnelles du noyau.

L'existence des multiphonons montre que des fermions peuvent osciller selon des modes bosons, bien que cela paraisse paradoxal. Tout n'est cependant pas encore résolu. L'amplitude avec laquelle l'état à deux phonons est excité est beaucoup plus élevée que celle attendue, comme si un frottement sur une cloche provoquait le coccin. L'amplitude est proportionnelle à la probabilité d'excitation de la résonance. Évaluons d'abord quelle était l'amplitude, et donc la probabilité, qui étaient escomptées.

Les phonons sont des bosons. Les bosons ont l'« instinct grégaire », ce qui donne lieu à l'émission stimulée des photons, qui est à la base de l'effet laser.



7. LES FAISCEAUX atteignent des énergies de 20 mégaelectronvolts dans l'accélérateur du GANIL, dont on voit ici l'une des cavités accélératrices.

Rappelons le principe de l'émission stimulée. Quand n photons occupent un état excité, la probabilité pour qu'un nouveau photon rejoigne cet état est multipliée par n . Donc, plus il y a de photons déjà excités, plus la probabilité d'exciter un photon supplémentaire est grande. La probabilité d'exciter n photons obéit à la loi statistique de Poisson.

Si l'on applique le principe de l'émission stimulée à la vibration des noyaux atomiques, la probabilité d'exciter le deuxième phonon vaut donc deux fois la probabilité d'exciter le premier. Or, d'après les mesures expérimentales, elle vaut, non pas deux, mais quatre fois la probabilité d'exciter le premier phonon! Cette excitation superstimulée est restée un mystère pendant plusieurs années.

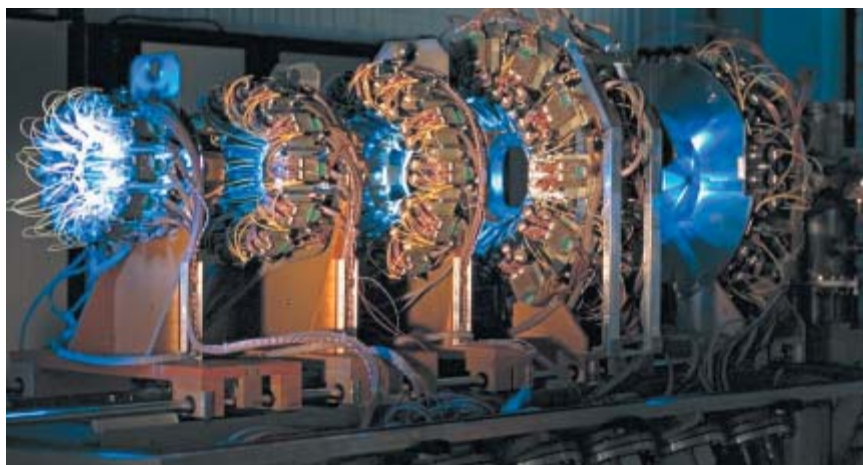
Des superstimulations

Ce mystère vient d'être résolu par les physiciens du GANIL et leurs collègues de Séville, en Espagne, et de Catane en Italie.

Le calcul quantique de l'évolution d'un oscillateur harmonique, auquel on applique une force, est connu. La solution correspond à une transformation galiléenne de l'état fondamental, c'est-à-dire que le paquet d'onde initial – le nuage de probabilité de présence – est simplement déplacé lors de la résonance, mais sa forme reste inchangée. Cet état correspond à l'excitation des phonons avec des probabilités poissonniennes. Le nombre moyen de phonons excités est proportionnel au déplacement du nuage, induit par la force. En clair, plus on excite, plus le nuage est déplacé, et plus les phonons sont nombreux.

Les valeurs moyennes de position et d'impulsion obéissent à des équations, dites équations d'Ehrenfest, identiques aux équations classiques du mouvement. C'est l'un des rares cas où, à cause de la symétrie de l'oscillateur, la mécanique classique et la mécanique quantique sont équivalentes. L'existence de la loi de Poisson est caractéristique de cette équivalence.

Dans le cas des résonances géantes la position serait une mesure de la déformation, et l'impulsion représenterait la vitesse de la déformation. Or les résonances géantes n'obéissent pas à la loi de Poisson, puisqu'expérimentalement, la probabilité d'excitation du deuxième phonon est deux fois plus élevée que celle calculée d'après



LE SYSTEME INDRA détecte les protons et toutes les particules chargées

cette loi (superstimulations). Le modèle des oscillateurs harmoniques quantiques se révèle insuffisant. La résonance géante n'est donc pas un oscillateur harmonique pur.

Nous avons introduit des anharmonicités dans le modèle de l'oscillateur. Dès lors, la solution quantique diffère de la solution classique. La simple translation en position et en vitesse de l'état fondamental n'est plus une solution exacte. Le paquet d'onde s'élargit et change d'allure pendant son mouvement. Pour déterminer la dynamique exacte, il faut alors non seulement connaître l'évolution de la valeur moyenne de la position et de l'impulsion, mais aussi celle de la forme du paquet d'onde. Ce point constitue la grande révolution de la mécanique quantique : imposer de décrire le mouvement d'une particule, non seulement par la valeur moyenne de sa position et de son impulsion, mais aussi par la forme de l'onde associée.

La largeur du paquet d'onde provient des fluctuations quantiques. Elle augmente en présence d'anharmonicités et modifie la probabilité d'excitation. Si le champ externe est en outre non linéaire, c'est-à-dire si sa force dépend du nombre de phonons déjà excités, alors la probabilité d'exciter des états à deux phonons augmente. Le modèle que nous avons élaboré justifie que la probabilité d'exciter le deuxième phonon vaut quatre fois la probabilité d'exciter le premier, à cause des fluctuations quantiques et des non-linéarités.

Toutefois, pour valider ce modèle nous venons de commencer au GANIL une campagne de mesures qui vise à détecter le troisième phonon d'un noyau de calcium excité, grâce à l'usage des détecteurs de particules chargées les plus performants aujourd'hui (voir l'encadré de la page 37). Nous découvrirons si la vibration demeure harmonique et si l'émission superstimulée est encore plus forte.

Philippe CHOMAZ, Yorick BLUMENFELD et Jean-Antoine SCARPACI sont chercheurs respectivement au GANIL (Grand accélérateur national d'ions lourds), laboratoire CEA-DSM, CNRS IN2P3, à Caen, et à l'Institut de physique nucléaire, à Orsay.

C. VOLPE et Ph. CHOMAZ, *Multiple Collective Vibrations and Nonlinear Dynamics in Mean-Field Approaches*, in *Physical Review Letters*, vol. 83, p. 1119, 1999.
T. AUMANN, P.F. BORTIGNON et H. EMLING, *Multiphonon Giant Resonances in Nuclei*, in *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.*, vol. 48, 1998.

J. RITMAN et al., *First Observation of the Coulomb-excited Double Giant Dipole Resonance in ^{208}Pb via Double-gamma Decay*

in *Physical Review Letters*, vol. 70, p. 533, 1993.

J.-A. SCARPACI et al., *Signature of a Two-phonon State Through its Proton Decay Pattern*, in *Physical Review Letters*, vol. 71, p. 3766, 1993.

R. SCHMIDT et al., *Electromagnetic excitation of the double giant dipole resonance in ^{136}Xe* , in *Physical Review Letters*, vol. 70, pp. 1767-1770, 1993.

S. MORDECHAI et F. MOORE, *Double Giant Resonances in Atomic Nuclei*, in *Nature*, vol. 352, p. 393, 1991.

Ph. CHOMAZ et N. FRASCARIA, *Multiphonon excitation in nuclei : experimental results and theoretical description*, in *Physical Report*, vol. 252, nos 5 et 6, 1995.

Le clonage : état de l'art

JEAN-PAUL RENARD • XAVIER VIGNON

Objet de curiosité ou source d'inquiétude, le clonage animal par reprogrammation d'une cellule adulte est un outil que les biologistes maîtrisent de mieux en mieux, mais le taux de réussite reste faible.

En 1997, le clonage, c'est-à-dire la multiplication d'embryons génétiquement identiques sans recours à une fécondation, fait une entrée fracassante. C'est la naissance de Dolly, une brebis clonée. Pourquoi Dolly a-t-elle suscité tant de débats, alors que le clonage existe depuis les années 1950? Parce que Dolly est issue de la fusion d'un ovule ou ovocyte, dont on a retiré le noyau, et du noyau d'une cellule adulte prélevée sur sa sœur-mère ; auparavant, le clonage s'effectuait par scissiparité d'un embryon composé de deux cellules, ou par division d'embryons plus tardifs. Dolly innovait, car, jusqu'à elle, on pensait qu'un noyau de cellule adulte ne pouvait être remis dans un état embryonnaire ou « reprogrammé » pour s'engager dans un cycle de divisions aboutissant à la production d'un embryon, puis d'une jeune viable. En d'autres termes, pour le clonage, le noyau d'une cellule spécialisée (une cellule de peau, un globule blanc...) sert à former une cellule dite totipotente, c'est-à-dire capable de produire tous les types cellulaires d'un organisme.

Aujourd'hui, le clonage est appliqué chez un nombre croissant d'espèces animales : pour ce faire, on retire le matériel génétique d'un ovocyte prêt à être fécondé, ou d'un œuf en tout début de développement, et on le remplace par le matériel génétique d'une cellule prélevée sur l'animal à cloner. L'œuf composite commence à se diviser ; il est implanté dans l'utérus d'une mère porteuse, où il se développe comme un embryon normal, donnant un fœtus, puis un jeune animal.

Initialement développée chez les amphibiens, cette technique est, depuis quelques dizaines d'années, appliquée aux mammifères. En étu-

diant la transplantation des noyaux, les biologistes du développement ont précisé les événements qui se produisent lorsque le noyau d'une cellule plus ou moins spécialisée est reprogrammé pour induire un développement embryonnaire.

L'attrait de l'utilisation d'un autre type de cellules donneuses que les cellules embryonnaires dans les expériences de transfert de noyau ne se limite pas à la biologie du développement et à la compréhension des phénomènes de différenciation ou de vieillissement : on peut modifier l'information génétique contenue dans ces noyaux pour donner naissance, par une technique de transgénèse, à des animaux génétiquement modifiés.

Depuis Dolly, on a réussi le clonage à partir de cellules différenciées de quatre autres espèces de mammifères : la souris, la chèvre, la vache et le porc. Simultanément, on a constaté que les animaux clonés ont un développement fœtal et prénatal souvent anormal. Chez d'autres animaux, tels le lapin, le rat, le chien ou le singe, aucune naissance n'a encore été obtenue par transfert de noyau de cellule différenciée.

Ces résultats montrent que, malgré des progrès techniques tangibles, le clonage par transfert de noyau a des limites que nous allons détailler et qui



CES DEUX SOURIS sont des clones obtenus à l'INRA de Jouy-en-Josas à partir d'ovocytes et de cellules adultes.

ne seront, sinon repoussées, du moins expliquées qu'après de nouvelles recherches.

Le développement embryonnaire précoce est d'abord commandé par des facteurs cytoplasmiques maternels. Puis, après un temps propre à chaque espèce, par l'expression des gènes de l'embryon lui-même : l'information génétique contenue dans le noyau des cellules donneuses, initialement spécialisée, est utilisée pour contrôler le développement du nouveau embryon. Pour que les différentes étapes aient lieu, le noyau doit retrouver son état de noyau embryonnaire. On dit qu'il est reprogrammé.

La reprogrammation du génome

Les changements observés dans le noyau donneur après la reconstitution des embryons indiquent qu'il réagit à son nouvel environnement cytoplasmique. Par exemple, une fois greffé dans un ovocyte énucléé, la taille du noyau augmente et son enveloppe se modifie ; les histones, les protéines responsables du repliement de l'ADN se déplacent ; la transcription (la copie de l'ADN en ARN) s'interrompt.

Ainsi, des changements dans les noyaux donneurs avant le transfert, ou les caractéristiques mêmes de ces noyaux (les types de cellules dont ils sont issus et les stades du cycle cellulaire dans lesquels ils sont au moment du transfert), conditionnent le déroulement de ces transformations. Les caractéristiques des ovocytes receveurs sont aussi importantes que celles des noyaux donneurs.

Les ovocytes résultent d'une double division cellulaire, nommée méiose, de cellules germinales, qui divise par deux le nombre de chromosomes des cellules. Pendant cette

division, qui se déroule au sein d'une coque protectrice, la zone pellucide. Un ovocyte se forme, ainsi que deux globules polaires. Ces derniers, qui renferment des chromosomes surnuméraires, sont éliminés à la fin de la méiose (voir la figure 3).

Les ovocytes pris au stade de la deuxième métaphase, l'une des phases de la méiose, sont les plus favorables au clonage par transfert de noyau. Ils proviennent d'ovaires prélevés sur des animaux, d'origine et d'âge variables, et deviennent matures *in vivo*, ou après culture *in vitro* au laboratoire, selon les espèces. Les conditions de maturation sont mieux connues pour certaines espèces (vache, mouton) que pour d'autres (porc, chien). L'énucléation est pratiquée par micro-aspiration de l'ensemble des chromosomes, qui sont rassemblés en une plaque dite métaphasique, et du globule polaire. Ces manipulations influent sur la réussite du clonage, car elles modifient parfois le cytoplasme receveur, en l'activant plus rapidement.

Un bon ovocyte

Cette activation entraîne l'ensemble des processus biochimiques qui reproduisent les événements liés à la fécondation. Grâce à des oscillations de la concentration cytoplasmique en cal-

cium, l'activité du facteur nommé MPF (pour *Maturation Promoting Factor*) qui bloque les ovocytes au niveau de la deuxième métaphase est diminuée. Les ovocytes évoluent ainsi vers un état interphasique propice au développement. Le facteur MPF est un complexe protéique qui, une fois activé par une kinase (une enzyme qui apporte un groupement phosphate) entraîne la dissolution de l'enveloppe du noyau et la condensation des chromosomes. Dans la plupart des cas, le noyau donneur est transféré dans le cytoplasme receveur par une fusion de la cellule donneuse avec l'ovocyte. Cette fusion est aisément obtenue par une très brève impulsion électrique. Le noyau peut aussi être directement injecté dans le cytoplasme.

La brève stimulation électrique contribue à l'activation de l'ovocyte receveur, surtout lorsqu'il est dans un état proche de l'interphase. Cependant, quand l'ovocyte receveur est en métaphase II, ou que l'on injecte le noyau, ces stimulations électriques sur l'ovocyte sont insuffisantes pour le développement embryonnaire : on recourt alors à une incubation de l'ovocyte en présence d'inhibiteur de phosphorylation ou d'inhibiteur de la synthèse protéique après le transfert du noyau ; ces inhibiteurs participent à l'activation, car ils évitent que l'activité du MPF n'augmente

Pour le clonage, on utilise des impulsions électriques qui déclenchent des flux intracellulaires de calcium dont les variations participent au développement de l'embryon ; on peut aussi avoir recours à des composés chimiques qui inactivent le MPF, mais la totale innocuité de la procédure sur le développement ultérieur n'est pas démontrée. Outre la qualité de l'ovocyte, et les techniques de stimulation qui jouent un rôle important dans le développement de l'embryon, le clonage dépend des cellules donneuses.

Celles-ci proviennent de cellules en culture ou sont prélevées sur un tissu vivant. Selon l'application envisagée, elles sont des fibroblastes, des cellules (ces cellules peu différenciées sont à l'origine du tissu conjonctif) ou des cellules de tissus adultes, où différents stades de différenciation coexistent. Les seuls essais de clonage à partir de cellules complètement différenciées ont été effectués, sans succès à ce jour, sur la souris, avec des cellules nerveuses et des cellules de Sertoli adultes (des cellules des testicules). De même, chez la vache, nous n'avons pas obtenu de gestation à terme en utilisant, comme cellules donneuses de noyaux, des kératinocytes de l'épiderme. En revanche, les cellules prises dans un tissu en croissance, fœtal ou adulte, et donc



2. CES VACHES sont toutes des clones. Elles ont été obtenues à l'INRA de Jouy en-Josas. Les six veaux (à droite) sont tous issus de cellules cultivées après le prélèvement d'une biopsie sur l'oreille de l'une des trois grandes vaches (la troisième à partir de la gauche), qui sont elles-mêmes des clones.

une partie est encore peu différenciée, donne des animaux viables.

Dans la plupart des tissus biologiques, différents stades de différenciation cellulaire coexistent, mais on ne peut les distinguer : on ne peut donc prouver qu'un animal cloné résulte de l'usage d'un type donné de cellule différenciée. Cependant, les cellules complètement différenciées de granulosa (ces cellules entourent les ovocytes dans les ovaires) sont aisément identifiables : le succès de leur utilisation dans des expériences de clonage chez la vache et chez la souris montrent donc bien que des noyaux de cellules différenciées redeviennent parfois totipotents. Ainsi, les résultats obtenus chez plusieurs espèces de mammifères (voir la figure 6) montrent que l'efficacité du clonage dépend peu de l'état de dif-

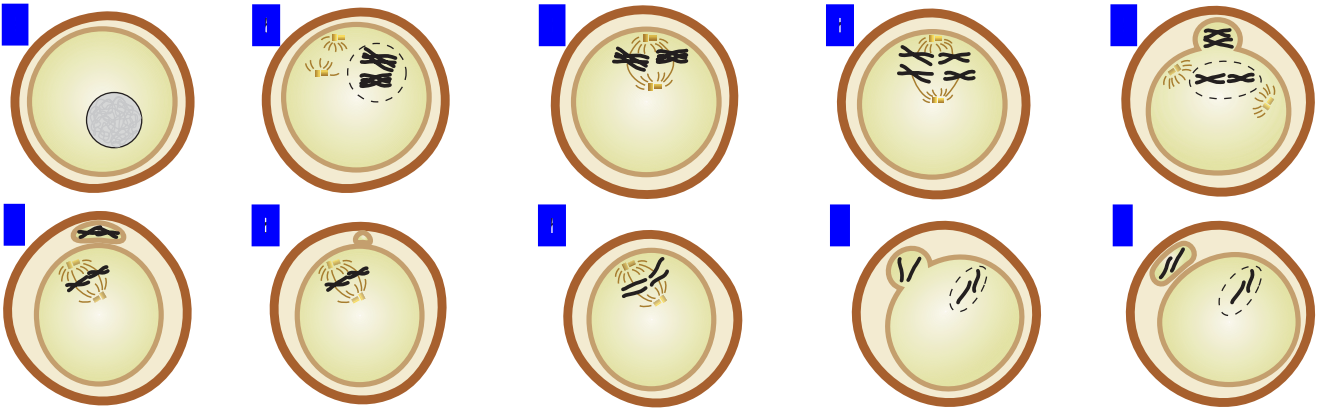
férenciation des cellules : les cellules germinales (qui sont les cellules souches des gamètes) ne sont pas plus favorables que les fibroblastes de la peau d'animaux adultes. De surcroît, nous avons montré, au laboratoire chez la souris, que l'efficacité du clonage n'est guère améliorée avec des cellules souches embryonnaires.

Cette variabilité des types cellulaires à l'origine d'animaux viables témoigne de l'importante plasticité du noyau des cellules engagées dans une voie de différenciation et permet d'imaginer le clonage à partir de cellules de tissus abondants et facilement accessibles, tels la peau ou le sang. Cependant, si de nombreux animaux ont été obtenus à partir de fibroblastes, un seul, un bovin, a été obtenu à partir d'une cellule sanguine, un globule

rouge. Ce résultat, par ailleurs étonnant, puisqu'il pose la question de la réversibilité du réarrangement des gènes des immunoglobulines, requiert une confirmation.

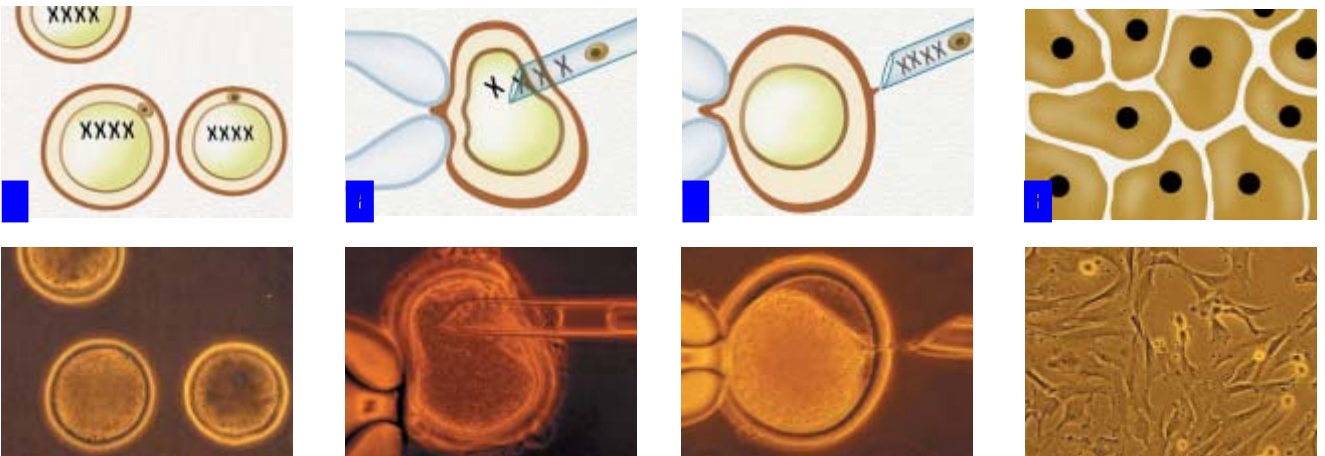
Et plus si affinités..

La plupart des travaux utilisent des fibroblastes mis en culture pendant plusieurs semaines et le plus souvent stockés à l'état congelé après une dizaine de jours environ. Le maintien de ces cultures pendant plusieurs mois, jusqu'à l'entrée des cellules en sénescence, ne compromet pas l'aptitude des noyaux à être reprogrammés : celle-ci ne dépend pas du temps de culture *in vitro* des cellules. Nous avons obtenu des bovins viables avec des cellules proches de la sénescence.



3. LA MEIOSE se déroule en deux cycles, à l'issue desquels le nombre de chromosomes d'un ovocyte est divisé par deux. L'ovocyte est entouré d'une zone de protection dite *pellucide* (en marron). Dans un ovocyte en interphase (a), après avoir été dupliqué, l'ADN du noyau se condense en tétrades, c'est-à-dire que les chromosomes sont en paires et dédoublés (b). Lors de la première métaphase (c), ces tétrades se rassemblent sur le plan équatorial avant d'être séparées par le rétrécissement de microtubules

pendant la première anaphase (d). La cellule se coupe alors en deux de façon asymétrique (e) et entraîne la formation d'un premier globule polaire (f) qui contient la moitié des chromosomes dédoublés. L'ovocyte est en deuxième métaphase (g). Après activation ou fécondation, les microtubules séparent ensuite les chromosomes dédoublés (h) et un second globule polaire se forme lorsque l'ovocyte se scinde (i). Ce globule polaire reste au sein de la zone pellucide (j), puis dégénère.



4. L'OBTENTION D'UN CLONE nécessite diverses manipulations illustrées ici par des schémas (en haut) et les photographies correspondantes (en bas). On prélève un ovocyte « receveur » et une cellule « donneuse » de matériel génétique, par exemple, une cellule de peau

sommée fibroblaste. On stimule la maturation des ovocytes receveurs dans un milieu de culture jusqu'à l'entrée en métaphase II (a). Puis le globule polaire et les chromosomes de l'ovule sont aspirés à l'aide d'une micropipette tandis qu'une pipette maintient l'ovocyte immo-

Chez le bovin, l'âge du donneur ne semble pas non plus influencer sur le développement des embryons obtenus : des taureaux âgés de 17 et 21 ans ont été clonés avec succès. De plus, aucun animal produit par transfert de noyau et vivant à l'heure actuelle ne présente de signe apparent de vieillissement, quel que soit le type de cellule dont il est issu : ainsi, les phénomènes d'érosion des télomères (à l'extrémité des chromosomes) qui accompagnent le vieillissement biologique des cellules ne semblent pas être accélérés chez les animaux issus d'un clonage. Des études chez le bovin, ont montré qu'à l'inverse de ce qui se passe chez Dolly, les télomères des clones n'étaient pas plus courts que ceux des animaux normaux.

Quand on transplante un noyau dans un ovocyte, l'activité élevée du MPF entraîne la dissolution de la membrane nucléaire et la condensation des chromosomes. Au moment de l'activation de l'ovocyte, l'activité du MPF chute et la membrane du noyau se reforme, puis la synthèse de l'ADN commence (voir la figure 5). Dès lors, si le noyau utilisé n'était pas diploïde (les chromosomes sont en paires) au moment de la transplantation, l'embryon aurait un nombre de chromosomes anormal. Il convient donc d'utiliser des cellules donneuses diploïdes avec les cytoplasmes en « métaphase ». On peut alors transplanter un noyau, soit avant la réplication de l'ADN dans un cytoplasme en métaphase II, soit à n'importe quel moment de l'interphase dans un cytoplasme lui-même en interphase. Le noyau poursuivra son cycle sans perdre

son enveloppe et sans qu'il n'y ait de condensation de ses chromosomes.

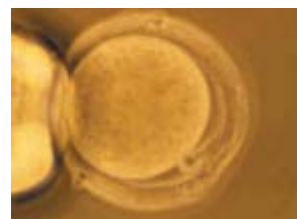
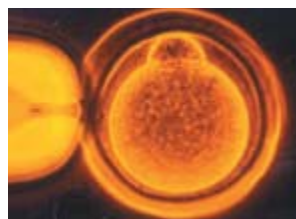
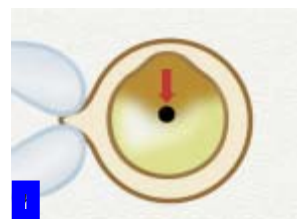
Cependant, la reprise du cycle cellulaire dans l'embryon est en principe suivie de l'expulsion du dernier globule polaire contenant un lot complet de chromosomes. Cette phase d'expulsion, qui est aléatoire chez la plupart des espèces dans les conditions expérimentales utilisées, peut être évitée par incubation de l'embryon en présence de cytochalasine, une molécule qui inhibe la polymérisation des microfilaments au cours de la période d'activation. Cette expulsion peut aussi être utilisée pour éliminer la moitié des chromosomes de sorte que le noyau résultant sera diploïde. C'est le cas chez la souris où l'expulsion d'un globule polaire, après l'activation, fournit des embryons ayant un nombre de chromosomes normal après transfert de noyaux en métaphase (tétraploïdes), dans des ovocytes eux-mêmes en métaphase II.

Ainsi, les premiers mammifères clonés à partir de cellules somatiques l'ont été avec des cellules quiescentes après une période de culture en milieu appauvri : l'ADN de ces cellules qui ne se divisent pas n'est pas dupliqué et la diploïdie est respectée. Toutefois, des expériences effectuées chez la souris avec des noyaux en métaphase, ou chez le bovin avec des noyaux non synchronisés, indiquent que cet état du noyau donneur n'est pas le seul qui soit compatible avec l'obtention d'un développement à terme. Par exemple, chez le bovin, nos études indiquent que l'état de quiescence des cellules donneuses n'est pas requis pour le développement des embryons clonés.

Plus que la phase du cycle dans laquelle se trouve le noyau, l'état de la chromatine du noyau serait déterminant dans les mécanismes de reprogrammation. Des noyaux de globules rouges d'amphibiens, dont l'ADN est empaqueté sous une forme inactive typique d'une cellule totalement différenciée, sont activés après un remodelage dans des extraits d'œuf de crapaud et après un traitement biochimique qui facilite les échanges entre le noyau et son environnement. Par une approche similaire, chez le bovin nous avons amélioré sensiblement le développement *in vitro* d'embryons clonés en prétraitant le noyau donneur avant de le transférer dans un ovocyte en interphase, de façon à ce que son ADN puisse être plus rapidement et plus longtemps accessible aux facteurs ovocytaires.

Les limites du clonage

Par ailleurs, on a récemment réussi le clonage somatique du porc grâce à une méthode en deux étapes : le noyau est remodelé dans un ovocyte en métaphase, puis, quand il s'est convenablement transformé, il est transféré dans un ovule fécondé dont on a supprimé le noyau. Aujourd'hui, le perfectionnement du clonage passe par la compréhension des remodelages de la chromatine et des chromosomes d'un noyau introduit dans un cytoplasme embryonnaire : l'activité du génome doit bien être reprogrammée pour qu'il fonctionne comme un génome embryonnaire. Il n'est pas sûr toutefois que cette reprogrammation implique une « remise à zéro » complète



ble (b) : il ne reste alors plus que le cytoplasme à l'intérieur de la zone pellucide (c). Un fibroblaste (d) est aspiré dans la micropipette et injecté sous la zone pellucide (e) : il s'accroche à la membrane de l'ovocyte (f). Après l'injection, le couple ovocyte-fibroblaste est sou-

mis à un choc électrique (g) qui facilite la fusion de la cellule donneuse et de l'ovocyte énucléé (h). Le noyau du fibroblaste, avec tous ses gènes, pénètre dans le cytoplasme de l'ovule. En quelques heures, la cellule qui a fusionné commence à se diviser.

Selon les méthodes employées et les espèces, un à deux tiers des embryons clonés avec des cellules somatiques se développent jusqu'au stade blastula quand apparaissent les premières différenciations cellulaires. Ce résultat est encourageant lorsqu'il est comparé aux proportions d'embryons issus de fécondation *in vitro* qui atteignent ce stade (en moyenne 60 pour cent chez la vache). Cependant, la seule preuve d'une reprogrammation complète reste le développement complet et normal d'un animal viable et fertile. À ce regard, bien qu'étant de plus en plus utilisé, le clonage a toujours une efficacité faible : de un à quatre pour cent seulement des embryons reconstitués avec des noyaux de cellules somatiques se développent à terme. Alors que les réussites d'implantation des embryons clonés transplantés sur une mère porteuse sont équivalentes à celles d'embryons non clonés, une majorité des pertes fœtales chez les moutons et chez les bovins a lieu au cours du premier tiers de la gestation, et avant la mi-gestation chez la souris.

Cette mortalité précoce est souvent associée à des anomalies du placenta. De surcroît, la mortalité tardive, lors du dernier tiers de la gestation ou après la naissance atteint parfois 50 pour cent. Les animaux ont alors une taille excessive, des organes, tels le foie, le cœur, les reins hypertrophiés, et sont quelquefois sujets à des détresses respiratoires, des troubles du rythme cardiaque ou des déficits immunitaires à la naissance.

On ignore la cause de cette surmortalité, mais elle prouve bien qu'on est loin de maîtriser la reprise de l'activité génétique. Ces échecs témoignent du manque de connaissances sur les mécanismes mis en jeu lors du clonage. Plutôt que de multiplier les naissances d'animaux obtenus par clonage somatique, les biologistes se concentrent aujourd'hui sur les phases clés de la reprogrammation d'un noyau de cellule différenciée en un noyau embryonnaire totipotent.

Les animaux de ferme sont de bons modèles expérimentaux pour l'analyse des anomalies du développement fœtal, car leur gestation est longue (neuf mois chez la vache). Certaines des anomalies du développement mentionnées précédemment sont aussi observées chez les embryons issus d'une fécondation *in vitro*. Décrits sous le terme de « syndrome du gros veau », ces anomalies semblent résulter d'une expression anormale de certains gènes dont le fonctionnement diffère selon qu'ils ont été apportés par le père ou par la mère, tel celui d'un facteur de croissance (on parle de gènes soumis à l'empreinte parentale). Elles proviennent aussi parfois des conditions de cultures *in vitro* qui précèdent la transplantation de l'embryon sur une mère porteuse. Ce résultat montre bien que, dès la fécondation, le développement résulte d'interactions entre l'activité du noyau et l'action du milieu environnant, nommée épigénèse.

Les données sur les animaux clonés sont rares, mais les effets à long terme rencontrés dans le cas du clonage

somatique ne sont sans doute que partiellement liés à des défauts d'empreinte parentale, car les anomalies diffèrent de celles observées après altération expérimentale de cette empreinte, chez la souris.

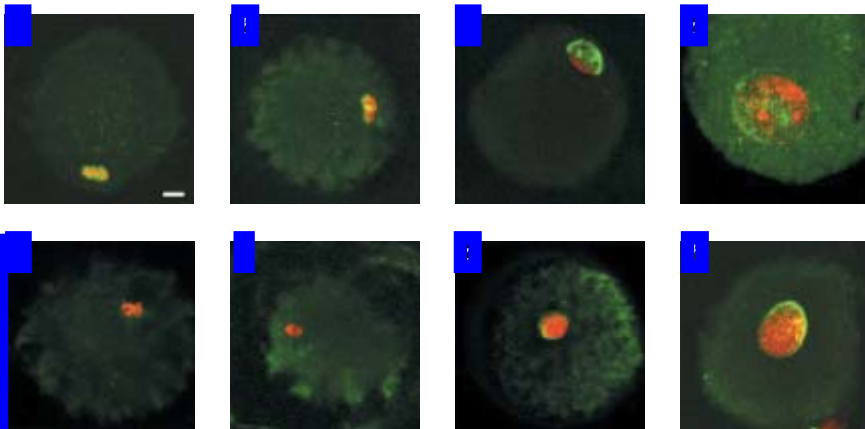
D'autres facteurs épigénétiques telles des perturbations au moment de la reconstitution de l'embryon par la procédure de transfert de noyau (l'activation de l'ovocyte receveur), ou bien la mauvaise synchronisation entre le développement du fœtus cloné et son environnement utérin, pourraient également perturber à long terme le développement embryonnaire et fœtal.

La transgénèse

Lorsque ces inconvénients seront surmontés, le clonage de jeunes animaux à partir de cellules en culture sera complété par l'insertion d'un gène dans le noyau de ces cellules avant de les utiliser pour le clonage : les animaux ainsi génétiquement modifiés par transfert de noyau seront utiles pour la recherche ou pour l'obtention de protéines à usage thérapeutique. Un premier exemple est celui de moutons qui fabriquent un facteur de coagulation humain.

La technique classique d'obtention d'animaux transgéniques est la microinjection d'ADN dans le noyau des embryons au stade de cellule unique. Largement utilisée ces dernières années pour la production de molécules thérapeutiques chez plusieurs espèces de mammifères domestiques, l'efficacité de cette méthode est cependant très variable. Chez plusieurs espèces dont la vache, jusqu'à 2 000 embryons sont nécessaires à l'obtention d'un veau transgénique, tandis que moins d'une centaine suffit par la voie du clonage.

En outre, la modification génétique de noyaux de cellules donneuses pendant une période de culture prolongée permet de cibler l'insertion d'un transgène ou de modifier précisément un gène. Pour cela, la construction moléculaire introduite contient des séquences d'ADN qui s'insèrent dans le gène endogène et le remplace. On effectue ainsi une transgénèse « propre » dans laquelle un gène peut être remplacé par un de ses variants naturels ou inactivé. Ce type de modification est aujourd'hui à l'étude dans plusieurs laboratoires pour modifier finement certaines caractéristiques de production, telle la qualité du lait.



5. LE TRANSFERT D'UN NOYAU (la tache brillante) diffère selon que l'ovocyte (la forme arrondie sombre) est en interphase (en haut) ou en métaphase (en bas). Dans le premier cas, l'enveloppe nucléaire (en vert) est maintenue durant toutes les phases qui suivent la fusion avec l'ovocyte (de a à d). Dans le second cas, l'enveloppe nucléaire se dissout (e et f) après la fusion, puis se reconstitue (g et h) autour de la chromatine (en rouge). Le noyau commencera un nouveau cycle de division lorsque l'enveloppe nucléaire sera complète. (la barre blanche représente dix micromètres).

L'inactivation d'un gène constitue un objectif important pour les industries pharmaceutiques qui utilisent des modèles animaux pour les pathologies humaines, et particulièrement pour les essais de thérapie génique. Par exemple, des lapins ou des moutons dont on aurait muté le gène impliqué dans la mucoviscidose seraient de bien meilleurs modèles de cette maladie humaine que la souris, puisque l'on pourrait expérimenter des approches thérapeutiques telles des bronchoscopies sur ces animaux de plus grande taille.

La naissance récente de moutons transgéniques issus du transfert de noyaux de fibroblastes dans lesquels un gène du procollagène (une protéine de soutien des tissus) a été inactivé est un premier succès qui préfigure les applications de l'association entre le clonage et la transgénèse. Ces applications pourraient être étendues au porc.

Quels que soient les objectifs recherchés, la culture des cellules donneuses de noyaux est une étape importante de la technique associant clonage et transgénèse.

De l'animal à l'homme ?

L'intégration d'un fragment d'ADN exogène. Celle-ci est meilleure quand les cellules sont en division rapide, ce qui n'est plus le cas pour des cellules en présénescence. L'obtention de lignées de cellules embryonnaires, qui sont stables et se divisent rapidement pendant plusieurs mois de culture, constitue l'une des voies qui aboutira à l'utilisation de la transgénèse chez les mammifères domestiques. Leur durée de vie serait suffisante pour effectuer toutes les étapes de la transgénèse.

«L'horreur du clone!» Ce cri est cette mise en garde du philosophe allemand Jünger Habermas à l'annonce de la naissance de Dolly traduit bien la réaction générale face à l'idée que le clonage puisse être un jour appliqué à l'être humain. Dès le 11 novembre 1997, dans une Déclaration universelle sur le génome humain, l'UNESCO a affirmé que «des

ESPECE ET TYPE DE CELLULES	JEUNES VIVANTS EMBRYONS TRANSPLANTES	EFFICACITE GLOBALE
OVINS		
Fibroblastes fœtaux génétiquement modifiés	7/67	12
BOVINS		
Cellules de peau d'adulte	9/191	16
SOURIS		
Cellules de follicule ovarien	3/287	14
CHÈVRES		
Cellules de foetus transgénique	3/112	15
PORCS		
Fibroblastes fœtaux	1/110	17

5. CE TABLEAU récapitule, pour chaque espèce, les types de cellules «donneuses» de matériel génétique qui se sont révélées efficaces pour un clonage. L'efficacité globale rend compte de la proportion d'ovocytes qui, après un transfert de noyau, ont donné un jeune vivant après l'étape intermédiaire de la plantation d'un embryon.

pratiques qui sont contraires à la dignité humaine, tel le clonage à des fins de reproduction, ne doivent pas être permises». Cet interdit est aujourd'hui toujours largement partagé, et même la très libérale Société américaine pour la médecine reproductive a reconnu que, s'il existait parfois de bonnes raisons pour recourir au clonage humain à des fins reproductives, aucun argument ne justifie son utilisation généralisée. Le clonage se présente donc comme une technique encadrée avant même d'être sortie des laboratoires. Son histoire montrera peut-être que cette technique a marqué une étape dans l'accompagnement par la société des progrès scientifiques dès leurs émergences.

Les peurs de voir un jour des bandes de «copies conformes» menacer la diversité biologique des espèces laissent place à des perspectives plus apaisées sur les apports de cette technique : par exemple, la création de modèles d'étude des maladies humaines ou de producteurs biologiques pour assurer, à partir d'un produit de sécrétion naturel, tel le lait, la synthèse de molécules complexes tels des anticorps, à usages thérapeutiques.

Par ailleurs, le clonage aiderait au maintien des espèces menacées, tel le Gaur (*Bos gaurus*), ou qui ont déjà dis-

paru, telles les chèvres Bucardo, en Espagne (voir l'article de Robert Lanza, Betsy Dresser et Philip Damiani, pages 46 à 49).

Enfin, cette technique permettrait d'utiliser les cellules donneuses de noyaux pour effectuer des microchirurgies très fines, par exemple, pour remplacer, au sein de la même espèce, un gène par un de ses variants : les résultats seraient identiques à ceux d'une sélection classique de ces animaux par des croisements sur plusieurs générations, mais seraient beaucoup plus rapides.

Ces promesses sont-elles des menaces sur l'équilibre qui régit de longue date les relations entre l'homme et l'animal ? Parce que le clonage pourrait nous donner un nouveau pouvoir de façonnage des races domestiques, voire des espèces sauvages, une clarification de nos représentations de l'animalité s'impose pour éclairer les décisions concernant l'application du clonage à l'homme.

Jean-Paul RENARD et Xavier VIGNON sont biologistes à l'Unité de biologie du développement et biotechnologies, INRA, Jouy-en-Josas.

X. VIGNON, P. CHESNÉ, D. LE BOUËRHIS, J.E. FLÉCHON, Y. HEYMAN et J.-P. RENARD, *Aptitude au développement des embryons bovins reconstitués par fusion de cellules somatiques cultivées avec des ovocytes énucléés. Clonage somatique chez les bovins*, in *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, n° 321, pp. 735-745, 1998.

J.-P. RENARD, S. CHASTANT, P. CHESNÉ, C. RICHARD, J. MARCHAL, N. CORDONNIER, P. CHAVATTE et X. VIGNON, *Lymphoid Hypoplasia induced by Somatic Cloning*, in *The Lancet*, n° 353, pp. 1489-1491, 1999.

J.-P. RENARD, *Dans le labyrinthe*, in *Faut-il vraiment cloner l'homme?*, collection Forum Diderot, PUF, 1998.

J.-P. RENARD, *Clonage : les bases du débat, in Clonage et éthique*, La Revue de la CFDT, n° 14, pp. 3-18, 1998.

J.-P. RENARD, *Transfert de noyaux et différenciation cellulaire : l'apport du clonage à l'étude des cellules souches embryonnaires*, in *Bull. Acad. Nat. Méd.*, vol. 184, n° 6, pp. 1155-1168, 2000.

Le clonage de l'arche de Noé

ROBERT LANZA • BETSY DRESSER • PHILIP DAMIANI

Grâce au clonage, les biologistes disposent d'un moyen d'éviter que les espèces animales menacées ne disparaissent à tout jamais.

Selon la légende, Noé a sauvé du Déluge un couple de chacune des espèces animales qui ont ensuite repeuplé la Terre. Aujourd'hui, la menace du Déluge est remplacée par la chasse abusive et la déforestation : de nombreuses espèces animales sont en voie de disparition.

Pourrait-on renouveler la prouesse de Noé ? Sans doute, grâce au clonage.

Par exemple



En novembre 2000, une vache a donné naissance à un clone d'une espèce en voie de disparition, un jeune baptisé fort à propos Noé. Noé est un gaur, un animal de grande taille proche du zébu, devenu rare en Inde, en Indochine et en Asie du Sud-Est. Ces bovins d'une bonne ont été chassés pour le plaisir du sport, et sont aujourd'hui menacés parce que leur habitat constitué de forêts, de jungles de bambous et d'herbages a été notablement réduit : il reste à peine quelque 36 000 gaur, qui figurent à ce titre sur la liste des espèces menacées dressée par l'Union mondiale pour la conservation de la nature. Par ailleurs, le commerce des gaur vivants ou des produits dérivés, tel les cornes, le cuir ou les sabots, est interdit par la Convention internationale du commerce des espèces menacées.

Le petit Noé aux pattes grêles ouvre une ère nouvelle pour la conservation des espèces ; il est la preuve qu'un animal peut donner naissance à l'exacte réplique génétique, ou clone, d'un animal d'une espèce différente.

Avec d'autres équipes, nous essayons de cloner des espèces menacées afin d'éviter qu'elles ne disparaissent : les principaux projets concernent l'antilope bongola d'Afrique (une antilope de taille moyenne avec des zébrures blanches verticales), le tigre de Sumatra et le chouchou des amateurs de zoo, le panda géant, peu enclin à se reproduire. Le clonage ferait également revivre des espèces déjà disparues, telle la chèvre espagnole bucardo, dont le dernier représentant, une femelle, est morte, la tête écrasée par un arbre, mais dont quelques cellules ont été conservées.

Grâce au clonage, des espèces en voie de disparition, peu fécondes dans les zoos, seront préservées jusqu'à ce que leur habitat soit reconstitué ; elles seront alors réintroduites dans leur milieu et rendues à la vie sauvage. Enfin, grâce au clonage, de nouveaux gènes peuvent être introduits dans le génome des espèces qui ne comptent plus que quelques survivants.

La plupart des zoos ne sont pas équipés pour collecter ni conserver du sperme congelé. De même, les ovules sont difficiles à recueillir, et la congélation les endommage. En revanche, en clonant des animaux dont quelques cellules ont été sauvegardées, les biologistes conservent les gènes de ces individus, et parfois même augmentent la diversité génétique de cette espèce en voie d'extinction.

Un gaur est né

Malgré de tels avantages, certains spécialistes hésitent à utiliser les techniques de reproduction assistée, telles que la fécondation *in vitro* et le clonage, car ils craignent que ces méthodes ne sapent les efforts de préservation de la biodiversité. Nous sommes parfaitement convaincus que tout doit être fait pour préserver des espaces naturels sains, mais, dans certains cas, la bataille est déjà perdue : le clonage n'est pas une panacée, mais permet la sauvegarde d'espèces qui participent à la biodiversité.

Un clone requiert une mère porteuse, et peu de biologistes préconisent de prendre comme femelle porteuse des femelles sauvages d'animaux en voie de disparition, ou bien d'utiliser des pensionnaires d'un zoo : ainsi, le



LES CANDIDATS AU CLONAGE sont, entre autres, le guépard, l'antilope hongroise, le panda géant, le gaur et l'ocelot

clonage d'une espèce en voie de disparition requiert des cellules de deux espèces différentes.

Le clonage (voir l'article de Jean-Paul Renard et Xavier Vignon, pp. 40 à 45) consiste à aspirer le noyau d'un ovule (qui contient l'essentiel du matériel génétique de la cellule), de manière à ne laisser qu'un sac rempli d'un gel, le cytoplasme, puis à injecter une autre cellule, tout entière, sous la membrane de l'ovule. Enfin, une impulsion électrique entraîne la fusion de la cellule introduite et de l'ovule : l'embryon commence alors à se diviser. Quelques jours plus tard, il est implanté dans l'utérus d'une mère porteuse, préalablement traitée avec des hormones, qui donnera naissance à un clone au bout de quelques mois.

Toutefois, la mise en pratique de cette technique n'est pas sans faille. Pour Noé, notre équipe a effectué la fusion de 692 ovules de vaches énumérées avec des cellules de peau prélevées sur un gaur mâle. Seuls 81 des 692 embryons précoces clonés ont atteint le stade de blastulas, c'est-à-dire un amas creux d'une centaine de cellules. Puis, 42 blastulas ont été implantés chez 32 vaches, mais seules huit gestations ont suivi ! Les fœtus de deux vaches ont été prélevés pour être analysés ; pour quatre autres vaches, la gestation, qui dure normalement neuf mois, s'est spontanément interrompue au bout de deux mois ; enfin, une septième vache a perdu le fœtus.

Ces statistiques montrent que le clonage est plus un art qu'une science, surtout quand on transpose un embryon dans une espèce différente. Les résultats les meilleurs ont été obtenus avec des bovins implantés sur des vaches de la même espèce, mais ils restent médiocres : sur une centaine d'ovules de vaches ayant fusionné avec



LES CHEVRES BUCARDO ont disparu. Pourtant, elles pourraient peut-être grâce au clonage interspécifique.

des cellules de bovins adultes, seules une quinzaine ou une vingtaine donnent des blastocytes, et à peine dix pour cent arrivent à terme : on obtient un à deux animaux.

Nous espérons que les premières espèces en voie de disparition qui seront clonées seront celles dont la reproduction a déjà été bien étudiée dans plusieurs zoos et par diverses sociétés de sauvegarde. Par exemple, l'équipe de l'une d'entre nous (B. Dresser) a implanté un embryon préalablement congelé d'un chat sauvage africain dans l'utérus d'une chatte domestique « ordinaire ».

Depuis, outre le chat sauvage africain et le gaur, d'autres équipes ont transféré des embryons d'une espèce sur une mère porteuse d'espèce différente : un chat du désert de l'Inde chez un chat domestique ; une antilope bongou chez une antilope africaine plus commune ; un mouflon chez un mouflon domestique ; et un daim rouge rarissime chez un daim à queue blanche commun. Tous ces transferts ont abouti à des naissances.

Nous espérons que le clonage du guépard sera bientôt maîtrisé, car il ne reste environ que 12 000 de ces animaux en Afrique du Sud. Les guépards pratiquent

une cour interminable sur un vaste territoire, ce qui explique sans doute pourquoi ils s'accouplent si peu en captivité.

Haro sur le panda

L'un des candidats au clonage interspécifique, le panda géant, n'a pas encore fait l'objet d'expériences de transferts interspécifiques, mais a bénéficié de méthodes de reproduction assistée. En août 1999, au zoo de San Diego, Bai Yun et Shi Shi sont devenus les parents de la petite Hua Mei, après une insémination artificielle.

La population des pandas géants, symbole des espèces en voie de disparition, était estimée, il y a une vingtaine d'années, à quelque 1 000 individus dans les zones montagneuses des forêts de bambous du Sud-Ouest de la Chine. Nous voudrions obtenir du gouvernement chinois l'autorisation de cloner un panda géant, mais les biologistes chinois ont eux-mêmes notablement progressé. En août 1999, l'équipe de Dayuan Chen a effectué la fusion de cellules musculaires, utérines et mammaires de panda avec des ovules de lapine : les cellules composites formées ont atteint le stade de blastocyttes.

Une lapine ne sera jamais une mère porteuse pour un panda, mais une femelle d'ours brun d'Amérique pourrait l'être. Nous tentons d'obtenir des ovules d'une femelle d'ours brun tuée récemment aux États-Unis, en espérant les fusionner avec des cellules congelées de deux pandas morts ; des embryons clonés de panda géant pourraient être implantés sur une femelle d'ours brun vivant actuellement dans un zoo. On sait déjà que les femelles d'ours bruns peuvent être des mères porteuses.

En 1984, B. Dresser et Charles Pope de l'Université de Birmingham, ont annoncé la naissance d'une antilope bongou ; ils avaient prélevé de très jeunes embryons d'une femelle bongou en gestation et les avaient implantés sur une mère porteuse d'une espèce d'antilope plus commune.

La sous-espèce d'antilope bongou des montagnes ne compte plus qu'une cinquantaine d'animaux sauvages regroupés dans une petite région du Kenya. En revanche, près de 550 antilopes bongos vivent en captivité dans



des zoos. La sous-espèce bongo des plaines est un peu moins menacée : sa population atteint plusieurs milliers d'animaux dispersés en Afrique centrale et en Afrique de l'Ouest.

Des antilopes et des tigres

Un groupe international d'organisation de sauvegarde prévoit de relâcher sur deux sites du Kenya des bongos des montagnes élevés en captivité. Le clonage assure un «réservoir» de bongos que l'on pourra réintroduire dans la nature. Qu'en est-il des animaux qui ont déjà disparu ? La première difficulté est le manque de tissu préservé, et donc d'ADN. En 1999, des biologistes ont déterré ce qu'ils espéraient être un mammoth bien conservé, mais, au cours des siècles, des congélations et décongélations successives ont dégradé l'ADN, et les biologistes moléculaires ne savent pas «rapiécer» ces accrocs génétiques.

Il en est de même pour les loups de Tasmanie, qui se sont éteints dans les années 1930 : des biologistes de Sydney essayaient aujourd'hui de cloner des cellules d'un loup de Tasmanie conservé dans l'alcool en 1866, mais l'ADN est dans un tel état qu'ils devront sans doute reconstruire tous les chromosomes de l'animal, maillon après maillon.

La chèvre bucardo, dont l'extinction est récente, a plus de chances de ressusciter. Alberto Fernandez-Arias et José Folch, du Service de recherches agricoles de Saragosse, ont congelé du tissu de la dernière chèvre bucardo après avoir tenté pendant plusieurs années de protéger cet animal victime du braconnage, de la destruction de son habitat et des glissements de terrains. L'an dernier, les biologistes espagnols ont transféré des embryons d'une sous-espèce apparentée à la chèvre bucardo chez une chèvre domestique qui a donné naissance à des chevreaux.

Toutefois, même si les transferts nucléaires interspécifiques réussissent, ils ne donneront qu'une variété de clones, puisqu'on ne dispose que d'un seul animal, une femelle. Peut-être pourra-t-on «fabriquer» un mâle en retirant une copie du chromosome X dans l'une des cellules de la femelle bucardo et en ajoutant un chromosome Y issu d'une espèce de chèvres étroitement apparentée. Toutefois, cette technique, déjà utilisée pour manipuler des chromosomes humains, n'a encore jamais été appliquée au clonage

Les 101 dalmatiens

Le mouton, la vache, la chèvre et

la souris figurent parmi les ani-

maux domestiques que les biolo-

gistes ont réussi à cloner. Le clonage

d'un chien ou d'un chat ordinaire

est-il aussi aisé ? Hélas, non. À ce

jour aucune chatte à qui l'on avait

implanté des embryons de chats n'a

mis bas. Pour les chiens, la diffi-

culté est encore plus grande.



Nous avons entrepris un pro-

gramme de recherche pour assurer

la reproduction des animaux de compa-

gnie, mais aussi des chiens pour non-voyants

et des chiens de sauvetage et des animaux utilisés dans un but thérapeutique.

De nombreuses personnes espèrent obtenir, grâce au clonage d'un animal de com-

pagnie décédé, un animal qui aurait le même caractère et le même comportement, les

quels seraient en partie déterminés génétiquement. Bien que les chiens et les chats

abandonnés abondent, certains utilisent des techniques traditionnelles de croisement pour

obtenir l'animal souhaité ; le clonage offrirait une méthode plus efficace, notamment

pour les animaux de service.

Aujourd'hui, par exemple, les chiens mâles pour les non-voyants sont châtrés quand

ils sont tout jeunes, afin qu'ils soient plus attentifs au dressage rigoureux : toutefois

lorsqu'un chien est particulièrement compétent, on ne peut le croiser pour obtenir d'autres

chiens qui lui ressembleraient.

On devrait pouvoir bientôt cloner le chat domestique, car sa physiologie de la repro-

duction est bien connue, et le transfert d'embryons, précoces ou tardifs, a donné nais-

sance à des chatons. En revanche, des difficultés subsistent pour les chiens, dont la

physiologie de la reproduction est unique parmi les mammifères : la maturation des ovules

est très longue et, par ailleurs, le nombre d'ovules disponible est faible. À quand le clo-

nage des 101 dalmatiens ?

Pourquoi cloner ?

Nous pensons que le clonage des espèces en voie de disparition participera à la sauvegarde des espèces menacées. Certains biologistes prétextent, à tort, qu'il réduirait la diversité génétique déjà amoindrie de ces espèces. Nous militons pour qu'un réseau mondial assure la conservation de tissus congelés du plus grand nombre possible d'individus d'une espèce menacée : on disposerait d'un réservoir génétique pour reconstituer des populations entières d'une espèce donnée. Une telle entreprise serait peu onéreuse.

Pour certains, cette pratique éclipserait les efforts de restauration de l'habitat. Nous opposons à cette critique que, si la préservation de l'habitat est la clé de voûte de la conservation des espèces, certains pays sont trop pauvres ou trop instables pour faire cet effort. De surcroît, avec la démographie croissante, l'habitat de certaines espèces disparaît inexorablement. Le clonage interspécifique offre la possibilité de conserver le stock génétique de ces espèces sans les maintenir en captivité. Clonage et restauration de l'habitat doivent se conjuguer pour la sauvegarde des espèces en voie de disparition.

Robert LANZA est président du Centre de biologie cellulaire avancée de Worcester. Betsy DRESSER est directrice du Centre de recherches sur les espèces menacées à l'Institut Audubon. Philip DAMIAN est biologiste au Centre de biologie cellulaire avancée de Worcester.

Graham E. CORLEY-SMITH et Bruce P. BRANDHORST, *Preservation of Endangered Species and Populations: A Role for Genome Banking, Somatic Cell Cloning*

and Androgenesis?, in *Molecular Reproduction and Development*, vol. 53, n° 3, pp. 363-367, juillet 1999.

Russell A. MITTERMEIER, Cristina G. MITTERMEIER, Gustavo A.B. DA FONSECA et Jennifer KENT, *Biodiversity Hotspots for Conservation Priorities*, in *Nature*, vol. 403, n° 6772, pp. 853-858, 24 février 2000.

E.O. WILSON, *Vanishing before Our Eyes*, in *Time*, pp. 29-34, avril-mai 2000.

La fusée VASIMR

FRANKLIN CHANG DÍAZ

Il existe des fusées à forte poussée, mais grosses consommatrices de carburant ; d'autres ont un rendement élevé, mais une force de propulsion médiocre. Un nouveau type de fusées combine les avantages des deux précédents.

L'homme rêve de voyager dans l'espace. Au cours des 20 dernières années, j'ai eu la chance d'y aller six fois. Ces quelques 1 200 heures passées en mission m'ont donné le temps de contempler les étoiles et la Terre depuis l'espace. Quel spectacle ! Déjà avec mes amis, dans les années 1950, nous rêvions de voyager dans l'espace. J'ignorais alors à quel point ce rêve était partagé. Tous mes confrères, quel que soit leur pays d'origine, racontaient de semblables rêveries. Sans doute quitterons-nous un jour notre fragile planète pour explorer le cosmos.

Toutefois, si l'homme rêve d'aller dans les étoiles, il est encore dépourvu de tout moyen de s'y rendre vite. C'est pourquoi, avec mes collègues de la NASA, nous avons mis au point un nouveau moteur de fusée. Conçu pour les voyages dans l'espace lointain, VASIMR doit servir au premier voyage vers Mars prévu pour bientôt. Cette randonnée vers la planète rouge sera la première croisière interplanétaire.

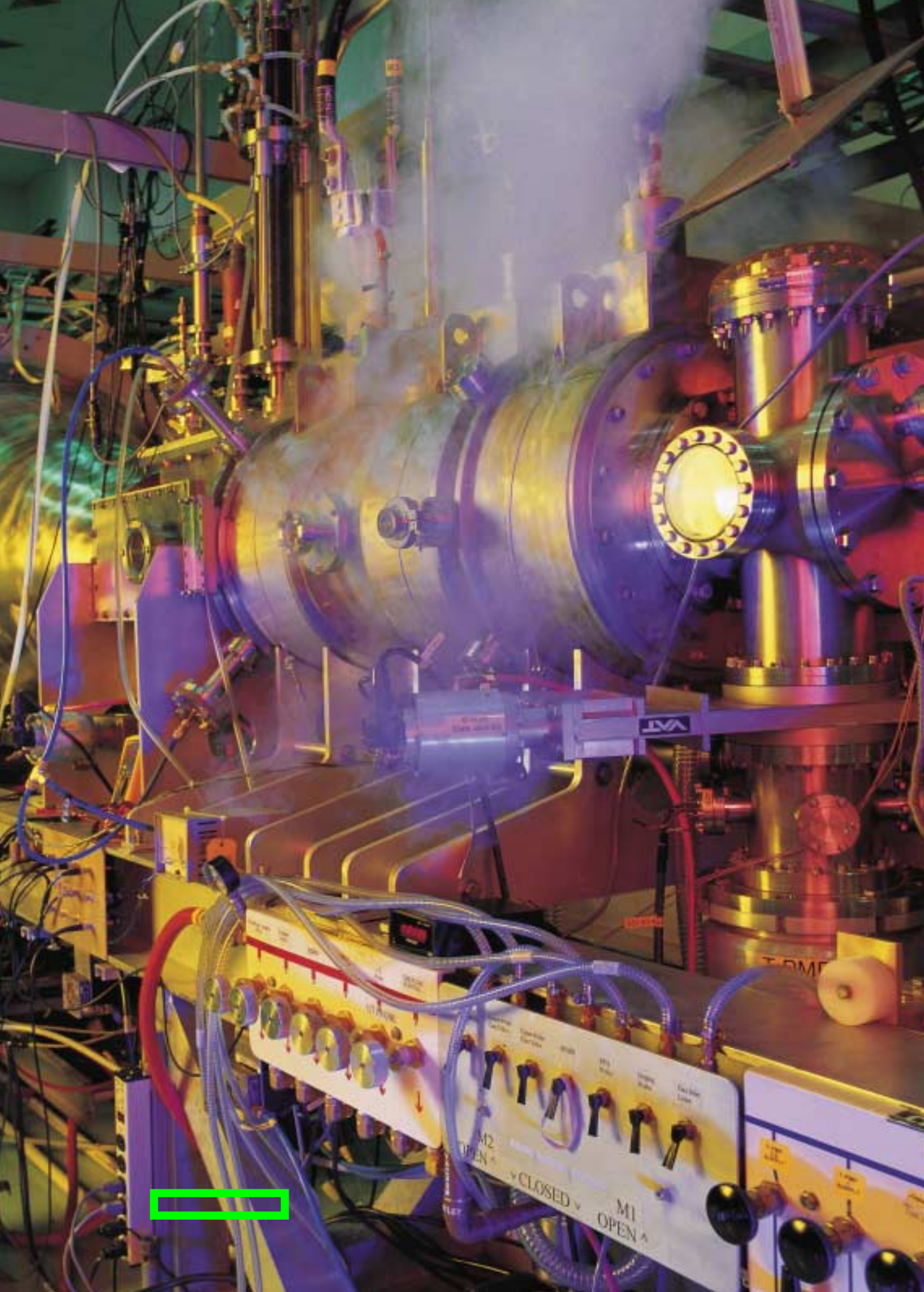
Un voyage vers la planète rouge avec les fusées à propulsion chimique actuelles durerait dix mois. La plus grande partie du véhicule serait occupée par le réservoir, et le carburant serait consommé en quelques brèves phases de poussées. La mission Apollo XIII a montré que, dans l'espace, les vaisseaux à propulsion chimique, repourvus d'autonomie, sont

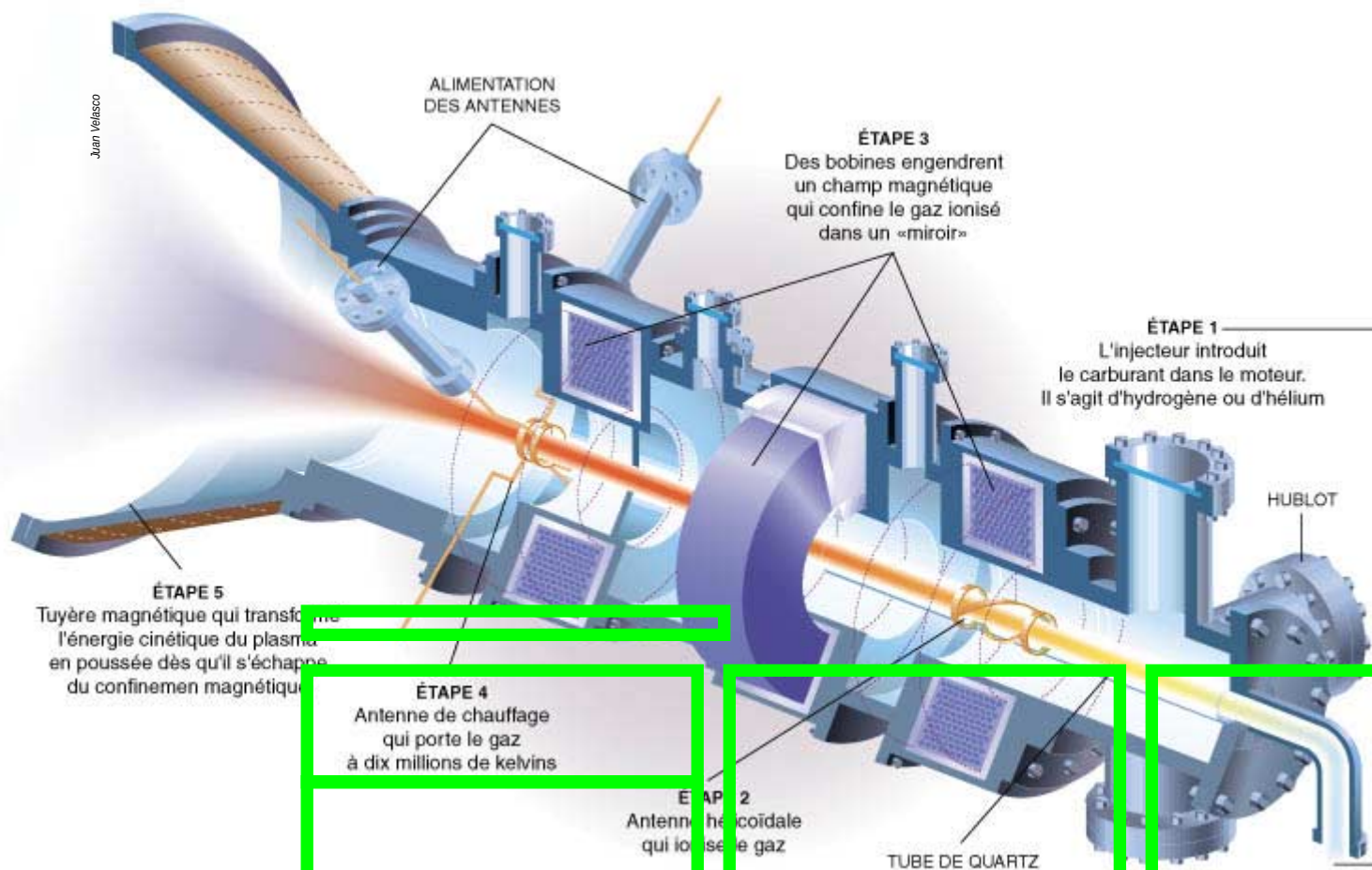
à la merci du moindre incident. Après l'explosion d'un réservoir, l'équipage de cette mission fut contraint de se réfugier dans le module d'alunissage, avec une quantité d'oxygène limitée et presque plus de carburant. Le sauvetage fut possible uniquement parce que l'accident eut lieu près de la Terre (à quelque 300 000 kilomètres). Un sauvetage serait impossible si un accident se produisait dans un vaisseau en route vers Mars. De surcroît, la lenteur due à la propulsion chimique menacerait la santé physique et morale de l'équipage, sans compter l'exposition prolongée aux rayonnements cosmiques, qui endommageraient le système immunitaire, et à l'impesanteur qui affaiblirait les muscles et les os.

Pour être sûr, un vaisseau interplanétaire habité doit être rapide, fiable et capable de rentrer d'urgence en cas d'incident grave. Il lui faut des systèmes de propulsion efficaces pour couvrir les immenses distances interplanétaires et pour manœuvrer à proximité des planètes de départ et d'arrivée. Tandis que la propulsion chimique continuera d'être une excellente

1. CE MOTEUR DE FUSÉE, dont le principe est entièrement nouveau, éjecte des gaz ionisés. Long de trois mètres environ, il produit des vitesses d'éjection sans précédent : 300 kilomètres par seconde. Le hublot fixé par des boulons, à droite, laisse apparaître l'intense luminosité du plasma produit à l'intérieur du moteur.

Pam Francis





2. PLAN du prototype X10 de moteur VASIMR.

méthode pour mettre des satellites sur orbite, d'autres moyens de propulsion seront nécessaires pour envoyer des hommes... dans les étoiles.

C'est cet objectif que nous poursuivons depuis le début des années 1980. Nous avons choisi d'adapter des fusées à plasma propulsées par des gaz ionisés accélérés à l'aide de champs magnétiques et électriques. VASIMR (pour *Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket*, c'est-à-dire moteur-fusée à impulsion spécifique variable) est le prototype que nous avons mis au point. Sa «naissance» remonte à la fin des années 1970, alors que je faisais des recherches sur la fusion nucléaire contrôlée. J'étudiais le confinement magnétique quand j'eus l'idée qu'un profil magnétique de forme appropriée constituerait une sorte de tuyère magnétique transformant l'énergie du plasma en énergie de propulsion. Les particules chargées restent confinées dans de tels «pièges magnétiques» qui isolent les plasmas ultra chauds dont la température atteint plusieurs centaines de millions de kelvins! Si ces plasmas confinés sont si

chauds, c'est que ces pièges magnétiques concentrent en leur sein une énorme énergie. Évacuée par la tuyère, l'énergie libérée par le gaz ionisé crée une poussée considérable. Une telle structure se comporte comme une tuyère classique de fusée, mais elle supporte des températures bien plus élevées. En outre, les moteurs à plasma autorisent une impulsion spécifique et, par conséquent, une poussée adaptable aux besoins.

Propulsion des fusées et loi de Newton

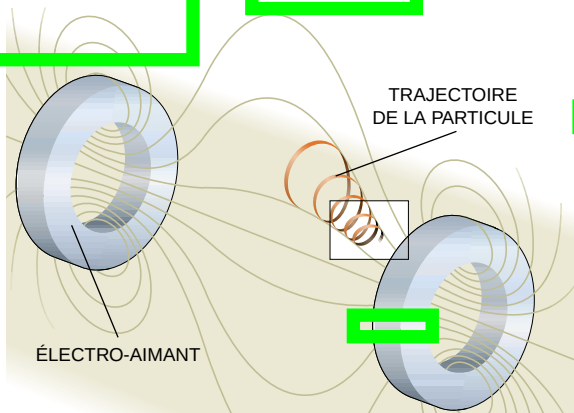
Rappelons quelques notions générales sur la propulsion des fusées. Elle satisfait à la loi de l'action et de la réaction de Newton. Cette loi stipule que toute action est contrebalancée par une réaction qui l'annule. Or, une fusée se propulse en éjectant des matériaux dans la direction opposée à celle de son déplacement. Au moment où ils s'éloignent, ces matériaux emportent une certaine quantité de mouvement. Pour la fusée, cette perte de quantité de mouvement dans

la direction d'éjection, implique le gain d'une quantité de mouvement équivalente dans la direction opposée, celle du vol. Dans le cas des fusées conventionnelles (à poudre ou à liquide), le matériau éjecté est un gaz chauffé par une réaction chimique. Avec VASIMR, c'est un plasma, c'est-à-dire un gaz ionisé, qui est éjecté.

La poussée d'une fusée est égale au produit de la vitesse d'éjection des gaz par le débit massique du carburant. Par conséquent, on peut produire la même poussée en éjectant beaucoup de gaz à faible vitesse ou, au contraire, peu de matière à très grande vitesse. Cette dernière solution économise le carburant, mais les puissances nécessaires sont très élevées.

Pour comparer les performances des moteurs, les ingénieurs utilisent la notion d'impulsion spécifique, une grandeur égale à la poussée divisée par le débit massique et par l'accélération de la pesanteur au niveau de la mer (ou à la vitesse d'éjection divisée par l'accélération de la pesanteur). L'impulsion spécifique se mesure en seconde. La puissance

3. UN PIÈGE MAGNÉTIQUE (OU CAVITÉ MAGNÉTIQUE) piège les particules et les confine, de sorte que le plasma est échauffé jusqu'à dix millions de kelvins. Il est constitué de deux électro-aimants qui se font face, de sorte que les lignes de champ magnétique qui les relient prennent la forme d'un tonneau. Dans le moteur VASIMR, un troisième électro-aimant s'ajoute aux deux premiers et forme une tuyère magnétique, d'où s'échappent les particules.

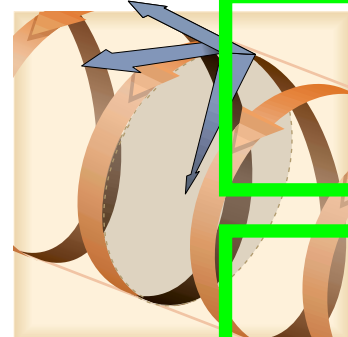


(mais demande pour cela un temps plus long), que celle que peut véhiculer (en prenant un temps plus court) une fusée à impulsion spécifique basse. Afin d'optimiser le temps de transport et la charge utile, nous avons élaboré une forme de commande de poussée à impulsion spécifique et puissances variables; j'ai nommé variation de poussée à puissance constante.

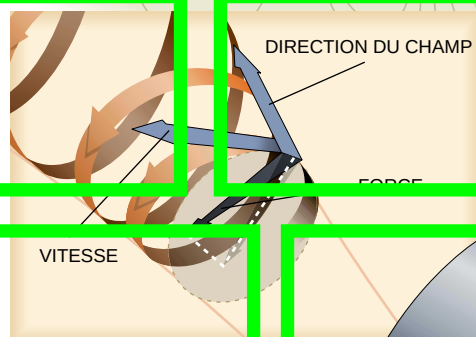
Comment un vaisseau spatial acquiert-il de l'énergie cinétique par éjection de gaz? Il est possible, en principe, que la vitesse du vaisseau égale celle d'éjection des gaz. Dans ce cas, un observateur au sol voit les particules quitter le vaisseau au repos. Toute l'énergie d'éjection est alors communiquée au vaisseau. Le rendement énergétique est maximum, mais la performance est obtenue au prix d'une consommation maximale de masse. C'est pourquoi les économies de carburant ne sont possibles que quand le vaisseau est plus lent. Pour être optimal, un vol doit pour ces raisons commencer à forte poussée et à forte accélération; ensuite, à mesure que la vitesse augmente, il est bon d'augmenter l'impulsion spécifique et de diminuer la poussée, de façon à économiser le carburant. Un conducteur de voiture fait exactement de même: lorsque, après avoir démarré, il passe rapidement toutes les vitesses avant de stabiliser son allure.

Miroirs magnétiques

Installé au Centre spatial Johnson, à Houston, le prototype VX-10 de moteur VASIMR contient des miroirs magnétiques, un type particulier de piège magnétique. La structure la plus simple de tels pièges est constituée de deux électro-aimants annulaires (deux miroirs), où le courant s'écoule dans une même direction. Les lignes de champ magnétique confinées près des bobines annulaires s'écartent vers le milieu de la cavité. Les particules chargées se déplacent selon une hélice, le long des lignes de champ; elles tournent à une fréquence dite «fréquence cyclotron» (la fréquence cyclotron est le nombre rotations décrites par seconde par la particule sous un champ magnétique donné). Les particules les plus lourdes (les ions) ont une fréquence cyclotron plus basse et un rayon de Larmor plus grand que les particules les plus légères (les électrons).



4. PRÈS DU CENTRE DU PIÈGE, les lignes de champ magnétique sont presque parallèles, de sorte que les forces magnétiques qui s'exercent sur les particules sont quasi radiales. Ces dernières progressent à vitesse constante le long d'une hélice de rayon quasi constant.



5. PRÈS DES ÉLECTRO-AIMANTS, les lignes de champ se courbent fortement pour se concentrer au centre de la bobine. La force magnétique acquiert alors une composante parallèle à l'axe reliant les deux électro-aimants, laquelle repousse les particules loin des électro-aimants. Les particules rebondissent sur les électro-aimants, se réfléchissant sur le «miroir magnétique» qui constitue la bobine.

nécessaire pour produire une certaine poussée est égale à l'énergie cinétique mise en œuvre par les gaz éjectés par unité de temps; elle est proportionnelle au carré de l'impulsion spécifique. La poussée, quant à elle, est proportionnelle à l'impulsion spécifique. Ainsi, la puissance nécessaire pour produire une poussée donnée croît avec l'impulsion spécifique (à rendement total constant). Dans les moteurs chimiques, cette puissance est libérée par les réactions exothermiques du comburant avec un oxydant. On peut aussi chauffer le carburant, par exemple avec l'énergie produite par des panneaux solaires ou par des réacteurs nucléaires.

Impulsions spécifiques élevées

Dans notre quête de bons rendements énergétiques, nous avons recherché des systèmes dont l'impulsion spécifique est élevée. Nous nous sommes détournés des moteurs chimiques dont les températures de combustion

ne dépassent pas quelques milliers de kelvins pour nous tourner vers les plasmas. La température de ces gaz est si élevée que les atomes ionisés sont dépouillés d'au moins un électron, voire de tous. Il se forme une sorte de «soupe» mélange d'ions chargés positivement et d'électrons chargés négativement. La température des ions des plasmas denses les plus chauds est de l'ordre de 10 000 kelvins et atteint même, en laboratoire, dix millions de kelvins. À de telles températures, les ions, qui constituent l'essentiel de la masse, se déplacent à près de 300 000 mètres par seconde, soit 60 fois plus vite que les particules éjectées par les plus puissants des moteurs chimiques à propulsion.

De telles fusées, la puissance du moteur est en général maintenue à son maximum, de sorte que la poussée et l'impulsion spécifique sont inversement proportionnelles. L'augmentation de l'une a toujours lieu au détriment de l'autre. Ainsi, si la puissance est constante, une fusée à impulsion spécifique élevée transporte une charge utile supérieure

Les champs intenses impliquent une fréquence cyclotron élevée et un petit rayon de Larmor. Par conséquent l'énergie correspondant à cette rotation est proportionnelle au champ magnétique local. Dans la VASIMR, la fréquence cyclotron des ions (des protons si le carburant est de l'hydrogène) est de quelques mégahertz, tandis que celle des électrons se compte en gigahertz.

Quels sont les mouvements des particules chargées à l'intérieur d'une cavité à miroirs magnétiques et quand elles en sortent? La vitesse des particules a deux composantes : l'une, tangentielle, est parallèle au champ (correspondant au déplacement vers l'avant le long de la ligne de champ) et l'autre, normale, est perpendiculaire (correspondant au déplacement orbital autour de la ligne de champ). Quand une particule se rapproche d'un champ plus intense, la compo-

sante normale de la vitesse augmente, mais la composante tangentielle diminue proportionnellement pour que l'énergie totale de la particule reste constante. C'est ce que les ingénieurs appelle «l'invariance adiabatique».

Ce phénomène est lié à la direction de la force qu'exerce le champ magnétique sur les particules : elle est toujours perpendiculaire à la vitesse de la particule et au champ magnétique. Près du centre de la cavité, où les lignes de champ sont parallèles, la force est radiale et n'a donc pas d'effet sur la composante tangentielle de la vitesse. Toutefois, lorsque la particule pénètre dans le goulot d'étranglement, la force magnétique change de direction, et rappelle la particule vers l'intérieur du miroir (voir la figure 5). Quand une particule quitte le goulot d'étranglement après avoir traversé l'anneau, le champ a l'effet opposé et la particule est accélérée

Comme il n'y a pas eu d'apport extérieur d'énergie, cette accélération se fait au détriment de la vitesse de rotation. Le champ magnétique ne confère pas d'énergie supplémentaire à la particule ; il ne participe qu'au transfert de cette énergie.

Ce mécanisme n'est valable que si la déformation des lignes de champ n'est pas trop brutale pour que le mouvement des particules ne soit pas trop perturbé, c'est la condition d'adiabaticité. Comme des voitures sur une autoroute dont la chaussée est irrégulière et qui ne peuvent négocier des virages trop serrés, les particules ne peuvent pas suivre des lignes de champ de trop forte courbure. Un miroir magnétique piège les particules, à condition qu'elles soient suffisamment lentes pour être réfléchies aux endroits des étranglements. Ainsi, les particules chargées rebondissent entre les deux bobines comme

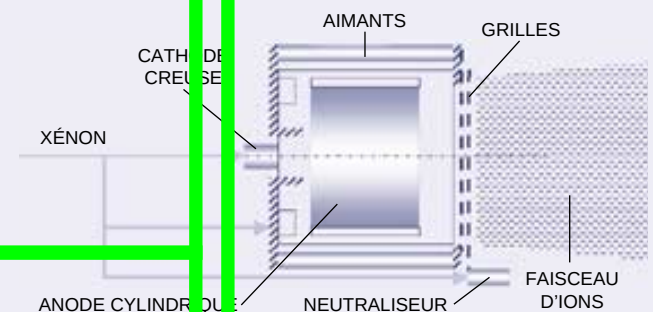
La propulsion électrique à bord des satellites

Proches de VASIMR, les moteurs électriques sont de plus en plus fréquemment embarqués à bord des satellites, où ils servent surtout aux corrections d'orbites. Il y a en deux types : les moteurs ioniques et les moteurs plasmiques (des moteurs à plasmas d'un principe différent de celui de VASIMR). Leur avantage est d'économiser la charge utile. Les propulseurs plasmiques actuels, par exemple, permettent de réduire la masse d'un satellite de plusieurs tonnes, de 700 kilogrammes. Si on les prévoit aussi pour servir au transfert en orbite géostationnaire, le gain de poids qu'ils rendent possible, dépasse les 1 500 kilogrammes!

Ces avantages sont recherchés, car le développement des télécommunications satellitaires implique des satellites géostationnaires de plus en plus lourds. Les exemplaires placés actuellement en orbite par Ariane V atteignent déjà cinq tonnes, mais des satellites encore plus lourds sont en construction, ce qui impose une augmentation de la capacité d'Ariane V. Si les nouveaux satellites géostationnaires sont de plus en plus lourds, c'est parce qu'ils emportent toujours plus de répéteurs, de microprocesseurs de traitement, etc. Cette électronique embarquée implique que le satellite dispose d'une forte puissance électrique, laquelle est un argument supplémentaire en faveur de la propulsion électrique, elle aussi gourmande en puissance.

Outre VASIMR, envisagé pour les missions martiennes habitées, plusieurs moteurs à plasma pour satellites sont en production ou à l'étude. En France, la Snecma a qualifié le moteur plasmique PPS1350 dont l'alimentation électrique est développée par avec la Société belge Alcatel/Etca. Son vol est déjà programmé à bord du

futur satellite de télécommunication Stentor ainsi que sur la sonde spatiale SMART ONE de l'Agence spatiale européenne. Un autre moteur similaire, est actuellement développé par la Société britannique Astrium. À puissance égale, les moteurs plasmiques satellitaires produisent des



Dans un moteur ionique, le fluide de propulsion, du xénon neutre, est ionisé par une décharge électrique continue entre la cathode et l'anode. Un champ magnétique créé par des aimants augmente le rayon de giration des électrons présents dans la chambre d'ionisation (issus de la décharge), ce qui multiplie les collisions avec des atomes neutres de xénon, et augmente le phénomène d'ionisation. Une fois ionisés, les ions de xénon sont accélérés entre les grilles. Environ 1/3 d'entre eux passent par les milliers de trous qui sont percées. Collés aux parois, les autres ions sont éjectés par les électrons ambiants, ce qui les rend à nouveau disponibles. Au moins deux grilles sont nécessaires (l'une positive et l'autre négative placée à l'extérieur) afin d'empêcher la migration d'une partie des électrons du neutraliseur dans la chambre d'ionisation, où il neutraliserait des ions, et réduiraient l'efficacité du moteur. Toutefois, les propulseurs les plus évolués sont dotés de trois grilles, dont une à la masse. Son rôle est de minimiser la pollution du satellite par les produits de l'érosion des grilles par les ions. Dès lors, les électrons émis par le neutraliseur suivent dans l'espace les ions positifs accélérés, et les y neutralisent.

des photons entre deux miroirs. Un miroir magnétique ne piège que les particules suffisamment lentes. Ces dernières rebondissent entre les anneaux jusqu'à ce qu'une perturbation augmente assez leur vitesse tangentielle pour les faire sortir du piège. Une telle augmentation de la vitesse peut résulter de collisions avec d'autres particules, d'interactions avec des ondes électromagnétiques ou encore de la turbulence ou d'instabilités du plasma.

Au final, les miroirs magnétiques agissent comme des sélecteurs d'énergie. Les particules les plus énergétiques sont les seules à pouvoir les quitter. Les autres restent confinées et gagnent en énergie. Notons que le moteur VASIMR est construit pour confiner les électrons. Ce n'est que parce qu'un plasma est toujours globalement neutre, que les ions accompagnent le mouvement des électrons

et sont confinés par leur... confinement. VASIMR utilise trois bobines magnétiques : une première, le miroir amont situé au niveau de l'injecteur qui ionise le gaz neutre, une bobine centrale refermant la première cavité et déterminant la fréquence cyclotron de l'amplificateur de puissance central, qui confère son énergie au plasma et, à l'aval, une tuyère magnétique qui l'éjecte le plasma dans l'espace. Dans le schéma de la figure 2, l'étage de puissance à résonance cyclotron est placé juste avant la tuyère magnétique (étape 4).

Chauder le plasma

On peut utiliser des électrodes qui produisent des arcs électriques, mais elles s'usent vite. Dans VASIMR, des ondes radio chauffent le plasma, comme les micro-ondes d'un four. À l'étage de l'injecteur, le gaz neutre

devient un plasma dense, mais relativement froid, puisque sa température est de l'ordre de 60 000 kelvins. On utilise des ondes dont la fréquence est comprise entre 10 et 50 mégahertz et qui confèrent de l'énergie aux électrons libres du gaz. À mesure que les électrons libres gagnent de l'énergie, ils arrachent d'autres électrons aux atomes voisins, au cours d'une cascade d'ionisation.

Puis le plasma s'écoule dans l'étage central, où il est chauffé par d'autres ondes, des oscillations cyclotron de fréquences inférieures, qui augmentent l'énergie de rotation des ions. Le champ électrique de ces ondes est perpendiculaire au champ magnétique externe (du aux électro-aimants) et tourne à la fréquence cyclotron des ions. Un phénomène de résonance fait accélérer les ions de plus en plus vite. Très utilisée dans la recherche sur la fusion contrôlée, cette technique de chauffage ionique

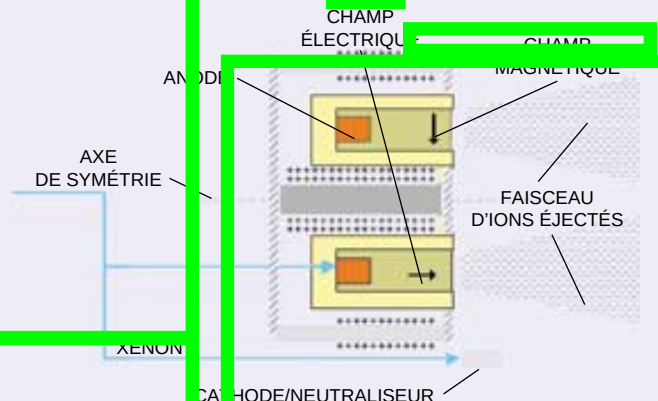
est bien supérieure à celle de VASIMR. Celle du PPS1350 est par exemple de 88 millinewtons pour 1 500 watts alors que le VX 10 de dix kilowatts développe 100 millinewtons. Sur 1 720 secondes, l'impulsion spécifique du PPS1350 est moins élevée que celle des moteurs ioniques, ses concurrents. Son rendement total est de 50 pour cent. Ces performances s'expliquent par le fait que PPS1350, comme les autres moteurs plasmiques comparables a été optimisé pour des satellites dont le rapport puissance/masse est de cinq kilowatts par tonne. VASIMR, en revanche, est destiné à un vaisseau spatial dont le rapport puissance/masse dépasse 100 kilowatts par tonne.

Au lieu d'expulser du plasma, les moteurs ioniques accélèrent des ions dans un champ électrostatique. Ils en existe plusieurs types, qui diffèrent par la méthode de production des ions. Les moteurs ioniques les plus au point sont ceux qui éjectent des ions par décharges continues en présence d'un champ magnétique ; ce sont d'ailleurs les seuls qui sont exploités commercialement par la Société américaine Hughes. L'accélération des ions y est obtenue à l'aide de grilles percées de trous. Des tensions d'accélération relativement fortes sont utilisées, ce qui conduit à une impulsion spécifique élevée. Cette tension est nécessaire afin de créer un champ électrostatique important entre les grilles ($\geq 1\,000$ volts par millimètre) et de manière à vaincre la répulsion électrostatique que les ions exercent les uns sur les autres.

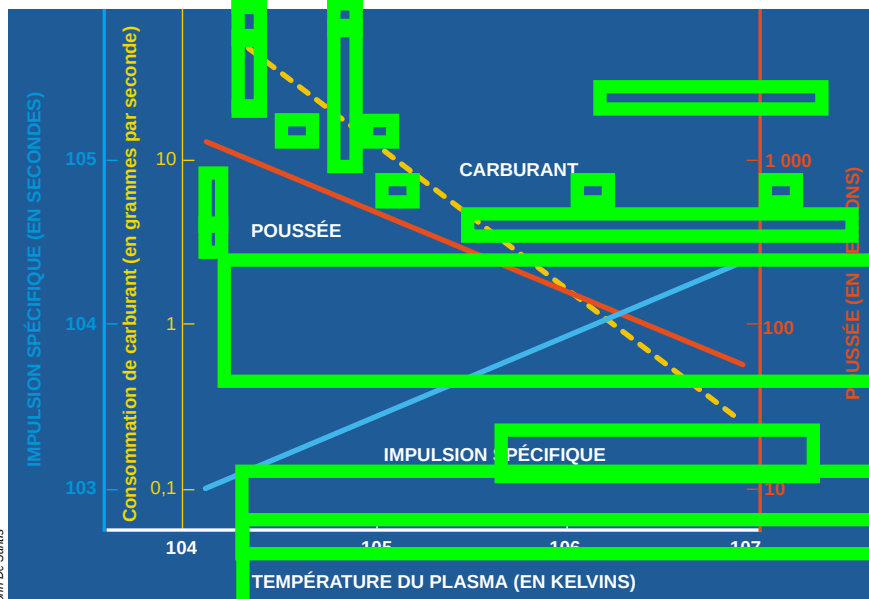
Les moteurs ioniques ont l'avantage de posséder une puissance spécifique (puissance dégagée divisée par la poussée) relativement importante (30 kilowatts par newton ou plus). Leur rendement total atteint 50 à 67 pour cent. Le moteur NSTAR de la NASA comporte, par exemple, des grilles de 30 centimètres de diamètre, avec lesquelles il produit une poussée de 90 millinewtons. Des ten-

sions relativement fortes sont mises en œuvre pour obtenir cette poussée, de sorte que le NSTAR possède une impulsion spécifique élevée, égale à 3000 secondes.

Dominique VALENTIAN, Snecma Moteurs



Dans un moteur plasmique, le fluide de propulsion, du xénon neutre, est ionisé par une décharge électrique continue entre la cathode et l'anode. Environ un quart des électrons émis par la cathode sont attirés par l'anode et entrent dans la chambre d'ionisation cylindrique. La présence d'un champ magnétique radial les fait spiraler, ce qui empêche qu'ils ne neutralisent les ions positifs de xénon. Cependant, leur présence crée un champ électrique dans le sens de l'axe du moteur, lequel accélère les ions, et les propulse dans l'espace. Les trois quarts restant des électrons issus de la cathode suivent les ions dans l'espace, et les y neutralise. Finalement parvenus à l'anode, les électrons présents dans la chambre d'ionisation sont convoyés à la cathode par le circuit électrique. Au final, la poussée est créée par un courant globalement neutre, ce qui évite les tensions élevées et la faible densité de poussée qui sont les inconvénients majeurs des moteurs ioniques. Les tensions des décharges d'ionisation varient entre 150 à 700 V suivant l'impulsion spécifique recherchée. Notons que la poussée d'un propulseur plasmique de 10 centimètres équivaut à celle d'un propulseur ionique de 30 cm. Une remarquable compacité, laquelle découle de la densité élevée de courant d'ions élevée, qui caractérise les moteurs plasmiques.



6. VASIMR contient l'équivalent d'une boîte de vitesse. Ce moteur est conçu de façon à ce que la température du plasma éjecté soit ajustable, ce qui accroît la vitesse d'éjection (donc l'impulsion spécifique, en bleu) et réduit la consommation de carburant (en jaune). Dans ce cas, la poussée produite diminue (en rouge). La puissance du moteur VASIMR, constante, est égale à dix mégawatts.

L'énergie vitale

Dans l'espace, l'énergie est vitale. Une vérité que l'aventure vécue par l'équipage d'Apollo XIII au printemps 1970 illustre. Les astronautes n'ont dû leur salut qu'à l'utilisation judicieuse du peu d'énergie qui restait dans les batteries. Le sauvetage aurait été impossible si le vol avait duré plus longtemps.

La rapidité de la propulsion et la fiabilité des équipements qui assurent la survie imposent une énergie minimale. La navette spatiale, par exemple, consomme environ 15 kilowatts en orbite tandis que la future station orbitale internationale consommera 75 kilowatts. Une mission vers Mars nécessiterait entre 20 et 60 kilowatts, sans compter l'énergie de propulsion. Avec une puissance supérieure, le voyage serait plus rapide : une fusée équipée d'un moteur VASIMR de 200 mégawatts atteindrait Mars en 39 jours.

Lors des expéditions dans l'espace proche de la Terre, l'énergie provient en général de combustibles chimiques et de panneaux solaires. La station orbitale tirera, par exemple, son énergie de 2 500 mètres carrés de panneaux. Toutefois, aussi bien les carburants chimiques que les panneaux solaires sont insuffisants, dès que l'on s'éloigne du Soleil. Ainsi, un «panneau» solaire de dix mégawatts, par exemple, mesurerait environ 68 000 mètres carrés sur Mars et 760 000 mètres carrés sur Jupiter ! Des tailles qui les rendent inviables.

Les seules sources d'énergie compactes et suffisamment puissantes sont nucléaires. L'électricité de bord de certains satellites a déjà été fournie par des générateurs thermo-électriques alimentés par la chaleur naturellement libérée lors de la désintégration du plutonium. Pour un vol habité, un tel système ne serait pas assez efficace. En revanche, un réacteur nucléaire embarqué, tirant son énergie de la fission de l'uranium, produirait dix millions de fois plus d'énergie que les «générateurs radio isotopiques à plutonium 238» du passé. Notons que les ingénieurs comparent les performances des sources d'énergie embarquées à l'aide du paramètre alpha, défini par le rapport de la masse de la «centrale» d'énergie en kilogrammes sur sa puissance exprimée en kilowatts. Plus alpha est petit, plus son rendement et sa puissance sont élevés. Aujourd'hui, les paramètres alpha des panneaux solaires embarqués sont compris entre 10 et 100. Ceux des piles à plutonium sont de 200. Celui d'un réacteur à uranium ne dépasse pas 0,5.

Enfin, les réacteurs nucléaires sont plus sûrs que les «générateurs radio isotopiques à plutonium», car le réacteur et son combustible peuvent être lancés séparément et assemblés sur une orbite éloignée de la Terre. Même ceux qui voudraient interdire l'utilisation de l'énergie nucléaire en orbite terrestre reconnaissent qu'elle pourrait servir lors des missions lointaines.

par résonance cyclotron confère à la fusée son impulsion spécifique élevée.

Après la création du plasma et son chauffage, le moteur doit encore fournir une poussée. Comment l'augmentation de la composante normale de la vitesse des ions peut-elle conférer aux gaz d'échappement la puissance nécessaire ? L'efficacité du système provient en fait de la forme des lignes de champs dans la tuyère magnétique. Leur divergence transfère de l'énergie de rotation en énergie cinétique longitudinale. Les ions massifs entraînent avec eux les électrons, de sorte que c'est un fluide neutre qui s'échappe de la fusée. Dans le cas de VASIMR, cette expansion du plasma dans la tuyère se produit sur plusieurs centaines de kilomètres.

Une fois l'expansion achevée, le plasma se détache de la fusée. Les études menées récemment par Roald Sagdeev, de l'Université du Maryland, et Boris Breizman, de l'Université du Texas, ont mis en évidence les mécanismes sous-jacents. La «vitesse d'Alfvén», d'après le nom du physicien suédois Hannes Alfvén qui l'a décrite le premier, y joue un rôle central. Alfvén montra que les perturbations d'un plasma se propagent le long des lignes de champ à cette vitesse précise. Dans une tuyère magnétique, la vitesse d'Alfvén joue un rôle semblable à celui de la vitesse du son dans une tuyère classique.

Le plasma se détache

Comme dans le cas du son, il existe donc un régime «subalfvénique» et un régime «superalfvénique». Ce «mur d'Alfvén» par analogie au «mur du son» est une frontière au-delà de laquelle le flux aval ne rétroagit plus sur le flux amont, de sorte que l'éjection ne crée pas de résistance à l'avancement de la fusée. La tuyère de VASIMR est conçue pour dilater le plasma au-delà de cette frontière, en un point où l'énergie du champ est faible par rapport à celle du flux de plasma. Quand le plasma se détache, il emporte avec lui une partie importante du champ. On pense qu'un phénomène semblable se produit dans la nature lorsque des protubérances de la couronne solaire échappent au champ magnétique du Soleil. La dépense d'énergie dans la partie où le champ est distordu diminue peu les performances de la fusée. Nos études montrent que le détachement

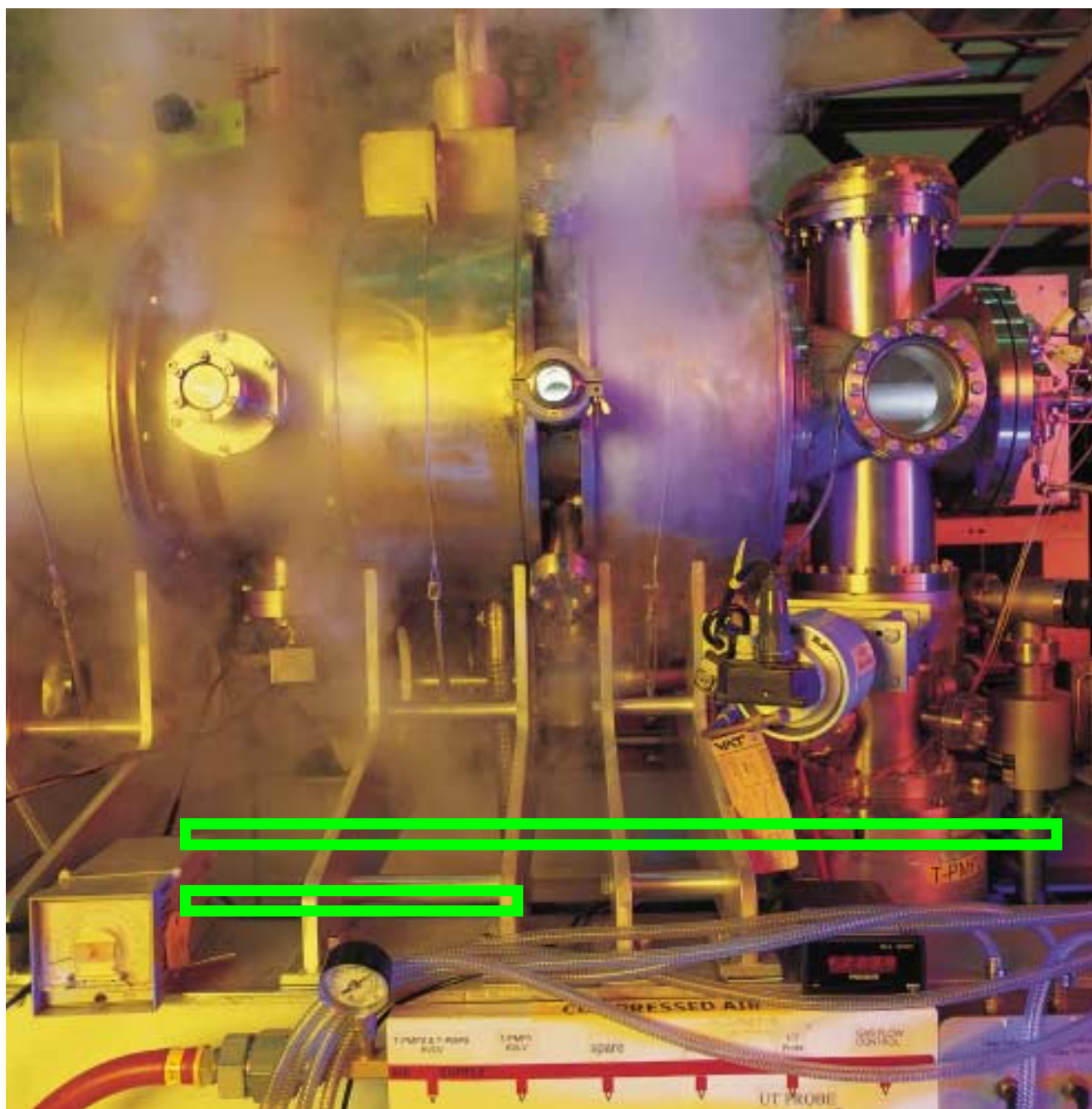
du plasma se produit un à deux mètres après le col de la tuyère.

Comment obtenir une variation de la poussée? Pour cela, nous avons prévu un moyen pour modifier l'une par rapport à l'autre les énergies délivrées au système hélicoïdal et au système de chauffage ionique par résonance cyclotron. Quand il s'agit d'obtenir une forte poussée, l'énergie est acheminée en priorité vers le système hélicoïdal, ce qui produit beaucoup d'ions à faible vitesse. Pour obtenir des impulsions spécifiques élevées (et une poussée réduite),

d'avantage d'énergie est envoyée vers le système de chauffage. Nous étudions également deux autres techniques de tuyère : un démarreur magnétique placé au niveau du de la tuyère qui produit une impulsion spécifique élevée (de manière à optimiser le champ en fonction de l'énergie du plasma), et un dispositif de postcombustion des atomes neutres restés dans le plasma, lequel produit une forte poussée à impulsion spécifique très basse.

Nous pouvions craindre que la régulation de poussée ne se fasse au

détriment du rendement énergétique. La création d'un plasma d'hydrogène nécessite environ 14 électronvolts par paire électron-ion (rappelons qu'un électronvolt est l'énergie acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel de un volt). L'essentiel de cette énergie ne sert pas à la propulsion, mais seulement à la création du plasma. L'énergie cinétique qui engendre la poussée doit être rajoutée. Dans le premier prototype de VASIMR que nous avons construit, la quantité d'énergie cinétique ajoutée pour une impulsion spécifique élevée

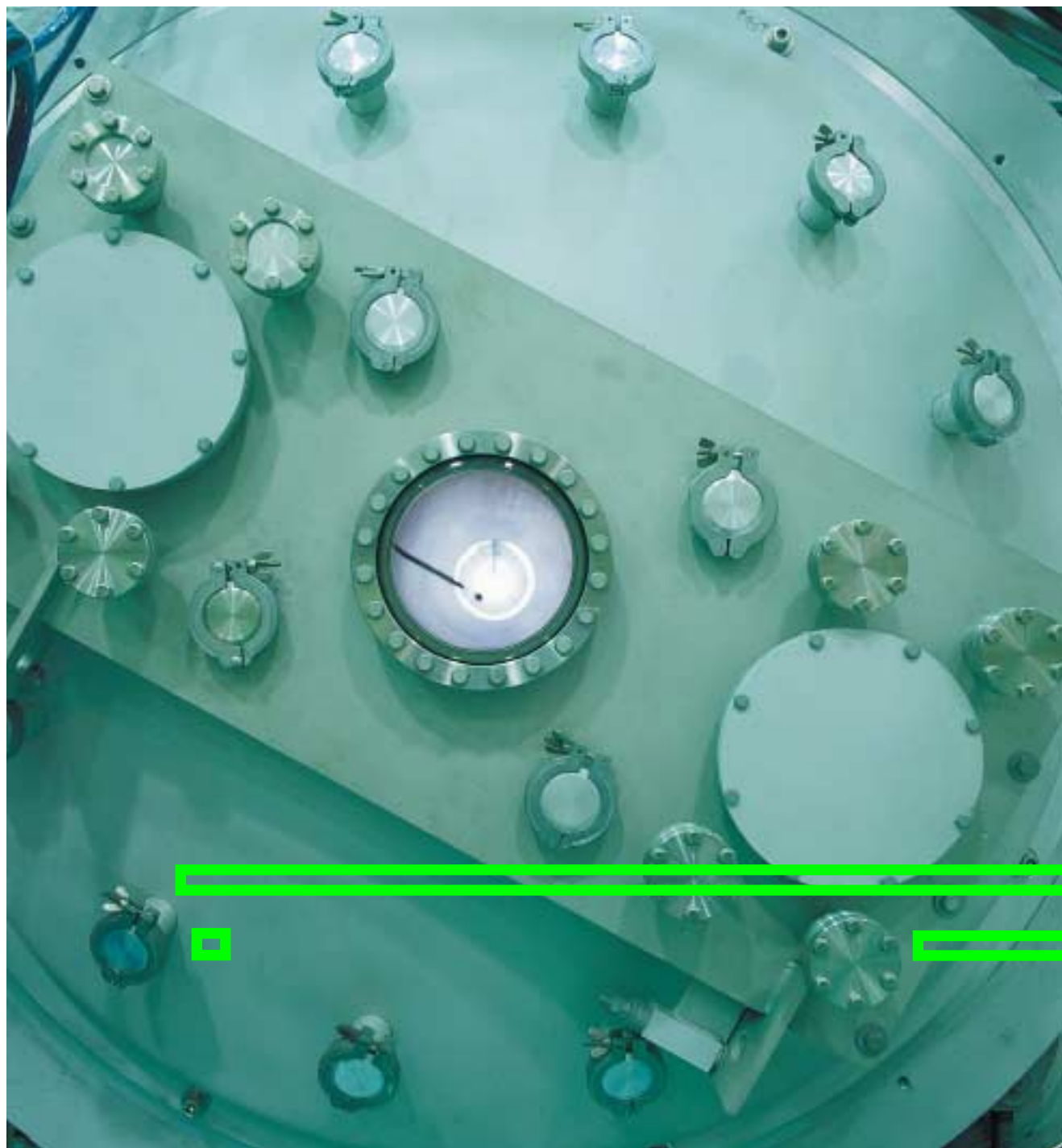


7. DES NUAGES ONDYOYANTS DE VASEUR sortent des puissants électro-aimants refroidis à l'azote liquide.

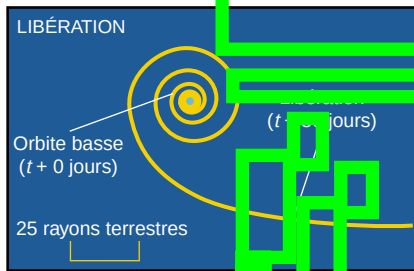
était d'environ 100 électronvolts par ion. Ainsi, une dépense totale d'énergie de 140 électronvolts donne 100 électronvolts d'énergie utile, ce qui représente un rendement électrique d'environ 70 pour cent. Les modèles de moteur VASIMR sur lesquels nous travaillons devraient atteindre des énergies de 800 à 1 000 électronvolts pour la même énergie initiale, ce qui améliorera notablement le rendement. Lorsque

l'impulsion spécifique est faible, on produit une quantité supérieure de plasma afin que la poussée soit plus forte ; l'énergie cinétique par particule se rapproche alors dangereusement de l'énergie d'ionisation, ce qui diminue l'efficacité du moteur. Toutefois, rappelons que l'on peut «choisir» le rendement selon la phase de la mission : quelques poussées fortes, mais brèves, peuvent parfois être plus efficaces. De surcroît, l'efficacité de

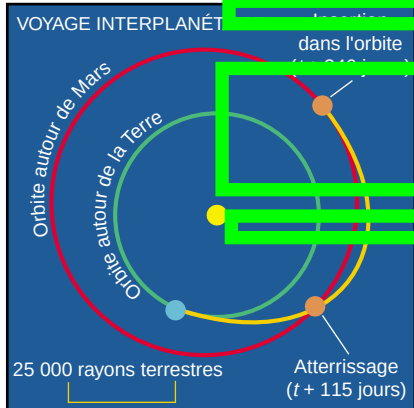
l'ionisation a une incidence sur le rendement. Une certaine proportion des atomes ne subit pas l'ionisation. Ils réduisent l'efficacité du moteur quand ils restent mélangés aux ions. Quand un atome neutre froid cède un électron à un ion chaud, l'atome neutre chaud résultant est insensible au champ magnétique et s'échappe, transférant son énergie sur les structures environnantes. L'ion froid qui subsiste est inutilisable.



8. UN Hublot de verre de 10 centimètres de diamètre, placée dans l'axe du moteur VASIMR, permet de vérifier l'allumage du plasma.



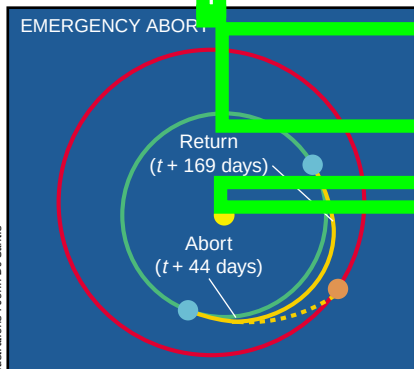
9. AU COMMENCEMENT DU VOYAGE vers Mars, un vaisseau doit acquérir une vitesse pour s'arracher à l'attraction terrestre. Le moteur VASIMR a alors une poussée maximale et une impulsion spécifique de 3 000 secondes.



Contrairement aux fusées à propulsion chimique, une fusée équipée d'un moteur VASIMR peut changer de régime : elle atteint une impulsion spécifique de 3 000 secondes, 75 jours après le décollage, puis elle ralentit.



Après s'être rapproché de Mars pour charger les astronautes, le vaisseau spatial rejoint progressivement une orbite autour de la planète rouge.



Une fusée équipée d'un moteur VASIMR aurait suffisamment d'autonomie pour revenir vers la Terre si un incident se produisait au début du voyage.

Pour réduire ce phénomène nuisible, les ingénieurs utilisent actuellement une technique de pompage radial des atomes neutres froids avant l'étagage de chauffage. Une fois pompés, les atomes froids sont réinjectés en aval du col de la tuyère où l'énergie cinétique désordonnée des ions a déjà été transformée en une énergie cinétique directionnelle. L'échange de charge facilite le détachement du plasma de la tuyère.

Bien que les antennes hélicoïdales puissent ioniser presque tous les gaz, ceux qui sont constitués d'éléments légers, comme l'hydrogène ou l'hélium, sont plus intéressants. En effet, le chauffage ionique par résonance cyclotron est facilité dans les gaz légers dont les fréquences cyclotron, pour des champs magnétiques modérés (de l'ordre de un tesla), sont compatibles avec les techniques radio existantes pour les hautes fréquences. L'hydrogène étant l'élément le plus abondant de l'Univers, les vaisseaux spatiaux trouveront du carburant presque partout. La production de champs magnétiques intenses est une difficulté que nous cherchons à surmonter. Nous étudions de nouveaux supraconducteurs à haute température qui contiennent des oxydes de bismuth, de strontium, de calcium et de cuivre. Nous prévoyons d'utiliser de l'hydrogène à très basse température pour les refroidir.

Aujourd'hui, l'essentiel des recherches que nous menons sur VASIMR est concentré sur le VX-40. Ce prototype ou l'un des modèles dérivés sera bien testé dans l'espace. Un essai est prévu pour 2004 lorsqu'un vaisseau spatial doté d'un moteur de dix kilowatts fonctionnant à l'énergie solaire partira étudier les ceintures de radiation de la Terre (ceintures de van Allen).

Un système VASIMR sera aussi employé pour neutraliser la pluie atmosphérique de la station spatiale internationale. Les résultats récents et les progrès rapides dans la miniaturisation du matériel radio augmentent bien du succès de ces premiers tests dans l'espace.

La véritable mise à l'épreuve de VASIMR se fera un jour au cours du voyage vers Mars. Les études en cours prévoient un système VASIMR de 12 mégawatts. Le vaisseau qui accomplira cette mission suivra pendant quelque 30 jours une trajectoire de libération en spirale avant de commencer un voyage interplanétaire de 85 jours (deux fois plus rapide qu'avec une fusée à propulsion chimique). Pendant cette traversée, la fusée accélérera pendant une grande partie du voyage, puis ralentira à l'approche de Mars. Un module habité se détachera du vaisseau pour aller se poser sur Mars à l'aide de fusées chimiques, tandis que le vaisseau interplanétaire crociera non loin de la planète rouge, pendant quatre mois, suivant une trajectoire « économe ». Afin de garantir la sécurité de l'équipage, il sera possible d'abandonner rapidement la mission en utilisant le mode « forte poussée du VASIMR ». Le champ magnétique et l'hydrogène feraient écran aux rayonnements cosmiques, protégeant l'équipage.

La fusée VASIMR pourrait n'être que le précurseur de fusées dont certains d'entre nous rêvent : les moteurs à fusion nucléaire. Leurs puissances iraient de 10 à 100 gigawatts. Bien sûr, nous sommes loin de maîtriser la fusion nucléaire mais les progrès sont constants. Sans doute les générations futures utiliseront-elles cette énergie pour voyager rapidement vers les planètes lointaines.

Franklin CHANG DÍAZ, docteur en physique des plasmas de l'Institut de technologie du Massachusetts, a participé à cinq missions spatiales, notamment au lancement de la sonde *Galileo* vers Jupiter et au dernier accostage entre la navette et la station spatiale russe *Mir*.

Gabriel GIANNINI, *Electrical Propulsion in Space*, in *Scientific American*, vol. 204, n° 3, pp. 57-65, mars 1961.

Ernst STUHLINGER, *Ion Propulsion for Space Flight*, McGraw-Hill, 1964.

F.R. CHANG DÍAZ et al., *The Develop-*

ment of the VASIMR Engine, in *Proceedings of the International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications*, papier 99-102, Turin, Italie, 13-17 septembre 1999. Texte disponible à l'adresse suivante : spaceflight.nasa.gov/mars/technology/propulsion/aspl

F.R. CHANG DÍAZ, J.P. SQUIRE, R.D. BENGTON, B.N. BREIZMAN, E.W. BAITY et M.D. CARTER, *The Physics and Engineering of the VASIMR Engine*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, papier 2000-3756, 17-19 juillet 2000.

Les premières sociétés d'Égypte

BARBARA BARICH • ENRICO BARICH

Les habitants d'un Sahara humide et verdoyant ont été les premiers agriculteurs. Quand la sécheresse les a chassés, ils ont migré vers le Nil, apportant leur savoir-faire à ce qui allait devenir la civilisation agricole égyptienne de la vallée du Nil.



L'OASIS DE FARAFRA attirait autrefois les bergers nomades du Sahara en quête d'eau pour leurs troupeaux.

Comment les premières sociétés d'Égypte se sont-elles formées? D'après les fouilles de la mission de l'Université de Rome dans

l'oasis de Farafra, l'agriculture serait apparue au Sahara. Elle aurait entraîné la sédentarisation des populations qui la pratiquaient. Toutefois, avec l'aridité croissante, celles-ci auraient migré vers les oasis, qui seraient devenues des centres culturels à l'origine du développement de l'agriculture dans la vallée du Nil.

Il y a 30 ans, on considérait que la civilisation égyptienne était née de contacts avec le Proche-Orient. Cependant, dans les années 1970, des archéologues ont suggéré que les habitants des régions sahariennes, aujourd'hui désertiques, avaient contribué à l'apparition de l'agriculture dans la vallée du Nil. Les fouilles dans ces régions

notamment lors de la construction du barrage d'Assouan entre 1965 et 1975, ont étayé cette hypothèse.

A partir des années 1980, une nouvelle approche archéologique est apparue : on a essayé de reconstituer l'environnement des populations étudiées afin de comprendre leur évolution. Les archéologues se sont intéressés au climat passé du Sahara et se sont aperçus que pendant l'Holocène (les 8 000 dernières années avant notre ère), des périodes humides avaient alterné avec des périodes de sécheresse. Ces changements ont transformé l'environnement des populations sahariennes et modifié les ressources en eau. Pour survivre, elles ont colonisé de nouvelles zones géographiques et adopté d'autres stratégies alimentaires, qui ont structuré leur économie et leur organisation sociale

La reconstitution de l'environnement

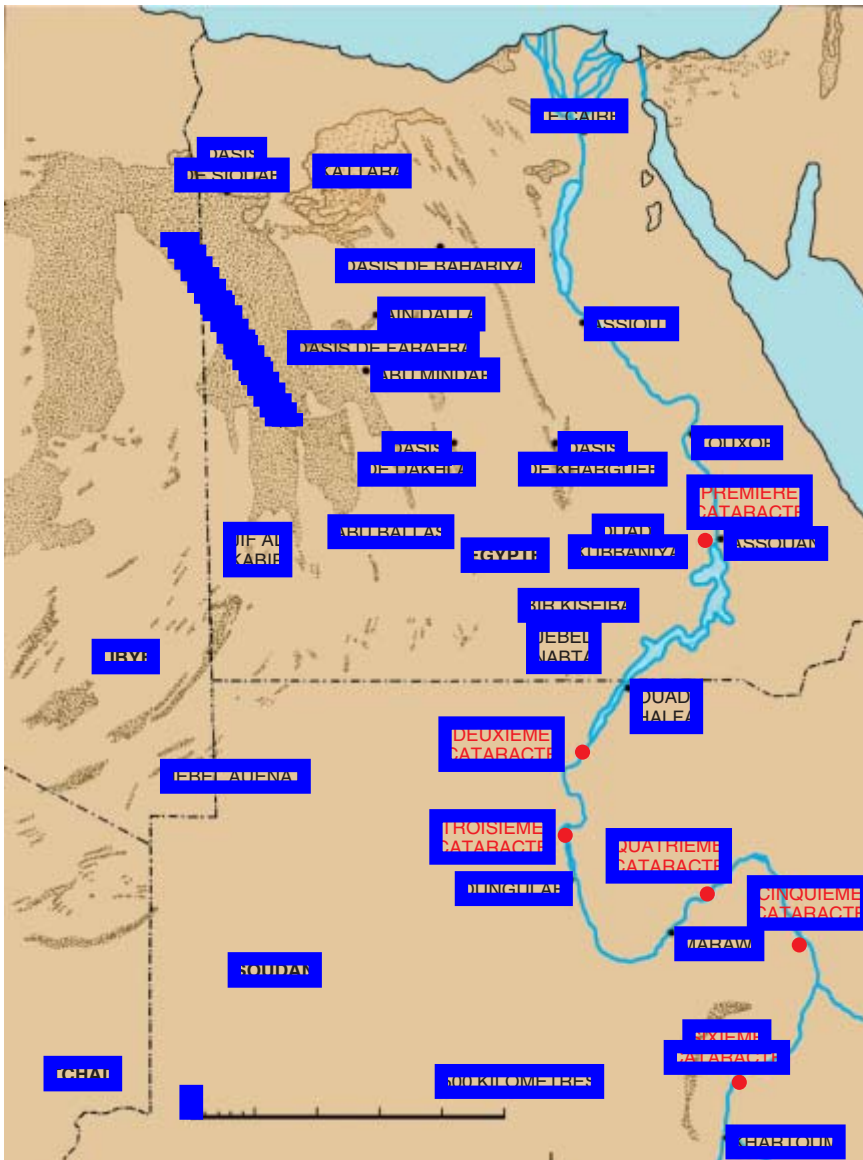
Aujourd'hui, grâce à l'étude des pollens et des sédiments, la reconstitution du climat passé progresse, fournissant de nouveaux indices aux archéologues. Les épisodes humides les plus importants ont eu lieu entre -7 000 et -6 600 et entre -4 000 et -2 500. La comparaison de ces dates avec l'âge des vestiges sahariens, que nous avons datés au carbone 14 ou avec d'autres éléments radioactifs, montre que les variations climatiques ont coïncidé avec des innovations culturelles. En outre, les datations des vestiges confirment que ces innovations se sont propagées d'Ouest en Est.

Lors des fouilles qu'ils ont menées dans la vallée du Nil et en Nubie, les archéologues ont étudié comment les





2. DANS LES VESTIGES DE FOYERS de l'oasis de Farafra, on a retrouvé des restes de grains de millet et de sorgho carbonisés, qui prouvent l'existence d'une forme d'agriculture, dès 5 000 avant notre ère.



3. A MESURE DE LA DESERTIFICATION du Sahara, les oasis, véritables réservoirs d'eau, commencent à accueillir des populations venues de l'Ouest. Elles deviennent des centres culturels importants.

sociétés sahariennes produisaient leur nourriture : ils ont recensé plusieurs types d'économie distincts entre la fin du Pléistocène (de -18 000 à -14 000) et le début de l'Holocène (vers -8 000). Pour comprendre comment ces économies ont émergé, le champ des fouilles a été élargi au Sahara entier, c'est-à-dire à la Libye, à l'Algérie, au Mali, au Niger, au Tchad et au Soudan. La majorité des vestiges laissés par l'homme datent de la fin du Pléistocène ou du début de l'Holocène, quand ce vaste territoire offrait un cadre de vie idéal, en termes de climat et d'environnement. L'eau y était abondante. Pour interpréter l'évolution des sociétés sahariennes, nous avons adopté le « modèle écologique », qui place le facteur environnemental au premier plan dans l'élaboration des identités culturelles. Ainsi, ces conditions climatiques clémentes seraient à l'origine de l'entrée des sociétés de toute la région dans une phase transitoire qui a précédé l'apparition d'une économie de production. Pendant cette phase, les populations utilisaient des ressources alimentaires variées : elles pratiquaient aussi bien la chasse et la pêche que la cueillette.

La civilisation de l'eau

Les études ont confirmé l'indépendance des centres culturels sahariens et de la vallée du Nil par rapport à ceux du Proche-Orient, qui sont plus anciens. Pendant l'Holocène, l'eau était abondante dans tout le Sahara. Les sociétés se sont organisées de façon à exploiter cette ressource au maximum. De -8 000 à -5 000, leur économie était surtout régie par la pêche. Puis la chasse et la pêche sont devenues les deux activités principales. Elles ont conditionné la production d'outils en os et en roches microlithiques (des roches semi-cristallines dans lesquelles les petits cristaux sont noyés dans une masse vitreuse) pour fabriquer des harpons. L'habitat a progressé, autorisant la sédentarisation.

La céramique est apparue vers -8 000 sur le continent africain. Au Sahara, les plus anciennes pièces retrouvées à Tagalagal, au Niger, et à Ti-n-Torha, en Libye, datent respectivement de -7 330 et -7 080 environ. Par la variété des sujets représentés, elles témoignent de la maîtrise d'exécution et de l'imagination des artisans qui les ont réalisées. Pourquoi les popu-

ations sahariennes ont-elles ressenti la nécessité de fabriquer des récipients en céramique? Répondaient-ils à une exigence fonctionnelle, liée à la transformation des habitudes alimentaires? Exprimaient-ils des traits culturels associés à cette nouvelle matière? Au début l'utilisation de ces nouveaux récipients devait être réservée à certains usages. Leur fabrication elle-même devait être chargée d'une signification particulière. Dans des sociétés où la magie et la religion imprégnaient tous les aspects de la vie quotidienne, le plus commun des instruments pouvait avoir un sens qui allait bien au-delà de sa simple utilisation pratique. Au fil du temps, ces récipients ont servi à contenir des céréales sauvages et peut-être du poisson séché.

Pendant que les sociétés sahariennes se structuraient et se sédentarisèrent, que s'est-il passé dans la vallée du Nil? À la fin du Paléolithique (vers -13 000), les communautés qui vivaient entre la première et la deuxième cataracte (voir la figure 3) utilisaient déjà leur territoire de façon saisonnière et planifiée. Au début de la saison des pluies, en juin, elles se consacraient à la pêche sur le fleuve, qu'elles abandonnaient quand les terres étaient inondées, entre juillet et septembre, pour chasser de petits animaux jusqu'aux limites du désert. En automne et pendant la saison sèche, d'octobre à février, elles revenaient vers le fleuve pour cueillir des tubercules et diverses plantes sauvages sur les dunes qui avaient retenu l'humidité de l'été. En même temps, elles reprenaient leurs activités de chasse et de pêche dans les passins permanents du Nil, en attendant le retour des pluies.

Au début de l'Holocène, cette utilisation des plantes comme ressource alimentaire, qui a joué un rôle déterminant dans la planification annuelle des stratégies alimentaires des anciennes populations de Kubbaniya et de Kom Ombo, disparaît complètement dans la vallée du Nil. Les inon-

1. LES VARIATIONS CLIMATIQUES semblent avoir été déterminantes dans l'évolution des sociétés sahariennes. Avec la sécheresse, l'eau se fait rare : les cours d'eau deviennent saisonniers, tel celui de Ouadi Auis, dans le massif de l'Acacus, en Libye (*en haut*). Ressemblent les sources des massifs montagneux, telles celles de l'Aïr, au Niger (*au milieu*). Les habitants du Sahara ont aussi recours au forage de puits pour atteindre une nappe d'eau souterraine qui jaillit, telle celle de Aïn Galaka au Tchad (*en bas*).



lations postglaciaires en sont probablement la cause.

En revanche, l'étude des sociétés du Sahara égyptien a révélé que, dans certains endroits, elles connaissaient et exploitaient diverses espèces botaniques de la famille du millet et du sorgho. Ces sociétés cultivaient les variétés sauvages de ces espèces. Même si elles ne les avaient pas encore domestiquées, elles savaient comment ces plantes se reproduisent et quand elles arrivent à maturité. Ces connaissances ont été nécessaires à l'établissement de l'économie de production qui a suivi. Nos fouilles confirment que les plantes constituaient une part importante du



5. LA MAJORITÉ DES OBJETS manufacturés découverts à Ti-n-Torha, dans le massif de l'Acacus, en Libye, datent de 7 000 à 6 500 avant notre ère, quand les conditions climatiques étaient favorables à l'homme : on y a retrouvé ces fragments de céramique avec décoration imprimée et cette spatule en os poli. En haut à gauche, cet outil de pierre est une meule qui servait au travail des graminées. Elle témoigne de l'intégration des ressources végétales dans l'alimentation des populations sahariennes.

régime alimentaire des populations sahariennes, notamment dans le désert occidental égyptien, mais aussi plus à l'Ouest, dans le Sahara libyen.

La migration des populations sahariennes

Les vestiges que nous avons retrouvés dans les oasis égyptiennes illustrent le lien qu'elles ont tissé entre le Sahara et la vallée du Nil. Contrairement à ce que l'on pensait, les populations sahariennes ont été les premières à atteindre cette vallée, avant celles du Proche-Orient. Elles se sont mélangées avec les populations des oasis, puis ont continué leur migration vers la vallée du Nil, où elles ont contribué à la naissance de l'agriculture à la fin du Néolithique et pendant la période pré-dynastique.

Dans la zone désertique, à mi-chemin entre le Sahara et la vallée du Nil, nous avons mis en évidence un processus de sédentarisation fondé sur une exploitation croissante des espèces botaniques cultivables. Des grains de sorgho carbonisés, retrouvés dans un village proche de Farafra, à l'intérieur d'un foyer, ont fourni la preuve de l'existence d'une forme d'agriculture.



Les chasseurs protocultivateurs des oasis, notamment celles de Dakhla et de Farafra, étaient en contact avec les habitants du Sahara occidental, car ils avaient une industrie lithique semblable. Ces contacts semblent avoir été nombreux au début de l'Holocène. En revanche, pendant la période de sécheresse entre -5 000 et -4 000, on constate un abandon des oasis : leurs habitants se seraient déplacés vers la vallée du Nil.

Les modèles d'habitat et les attitudes économiques se seraient transformés sous l'influence du climat. Au début de l'Holocène, les précipitations intermittentes et imprévisibles auraient entraîné une plus grande mobilité des populations, qui se déplaçaient afin d'assurer leur subsistance. À l'inverse, entre -6 600 et -5 000 ans, les pluies fréquentes et régulières tout au long de l'année auraient favorisé une sédentarisation et la reprise des activités de chasse. Le pastoralisme nomade commence à s'imposer entre -5 000 et -4 000, avec l'instauration d'un climat plus aride entrecoupé d'épisodes humides de 50 à 100 ans. Ces changements climatiques ont forcé les bergers à se déplacer, de la zone saharienne vers les limites méridionales du Sahel et vers la vallée du Nil, plus prospères. Le dessèchement progressif du Sahara marque le début de l'histoire des oasis. Celles-ci, véritables réservoirs d'eau, commencent alors à jouer le rôle de relais dans la traversée du désert et deviennent des centres culturels importants.

L'élevage extensif, où les troupeaux changent périodiquement de pâturage afin de laisser la terre se reposer, apparaît dans les régions sahariennes, où de nombreuses communautés le pratiquent encore aujourd'hui. À l'époque de pastoralisme, en particulier le pastoralisme nomade, pallie le manque d'eau. Des activités de sélection des espèces sont suivies, vers -4 000, des premières domestications, dans les massifs du Hoggar, Acacus et Tibesti.

Selon le « modèle écologique » que nous avons retenu, l'instabilité des ressources alimentaires a entraîné leur diversification pendant les phases initiales du passage à une économie de production. Les produits de la cueillette de plantes sauvages ont probablement été mélangés à ceux de l'agriculture. Dans le cas des populations du Sahara, la diminution du

nombre d'espèces sauvages liée à l'aridité croissante a entraîné la domestication du bœuf, précieux pour le travail de la terre et l'agriculture. L'environnement a ainsi déterminé le type d'économie et, par conséquent, la culture de ces peuples.

L'apport du monde pastoral

La diffusion de l'art rupestre montre que la culture pastorale était dominante dans tout le Sahara. Dans les massifs montagneux, des groupes ont réalisé des peintures et des gravures. Ces œuvres marquent sans doute les lieux où ils accomplissaient périodiquement des cérémonies pour renforcer leurs liens sociaux ou en créer de nouveaux (lors des mariages et des alliances) avec des représentants d'autres groupes. De fait, un groupe pastoral isolé n'aurait pas survécu longtemps. Ces liens entre groupes expliqueraient les vastes étendues de territoire où l'on retrouve des styles semblables. Ce geste artistique traduirait la volonté de nouer et de renforcer des alliances. L'art rupestre refléterait des liens sociaux au sein des populations du Sahara.

Le plus souvent, les peintures représentent des troupeaux. Les animaux domestiques semblent être le bien le plus précieux d'un point de vue social même avant qu'ils ne constituent une part importante de l'alimentation des populations sahariennes : ils servaient peut-être de monnaie d'échange dans les négociations sociales.

Entre -5 000 et -4 000, des tumulus funéraires découverts au Sahara, les alignements mégalithiques et les cercles calendaires de la région de Nabta Playas attestent une hiérarchisation des sociétés sahariennes pastorales. Notamment, les sépultures de bœufs témoignent de la valeur idéologique et du statut social liés à cette ressource.

Pendant les périodes de sécheresse entre -5 000 et -4 000, puis vers -2 500 et au-delà, les oasis attirent de plus en plus les groupes pastoraux à la recherche d'eau pour leurs troupeaux. Ces bergers se rendent aussi dans la vallée du Nil à partir des oasis, développant les échanges entre les deux zones géographiques. Dans un second temps, avec l'aridité croissante, une partie de la population des oasis se déplace vers la vallée du Nil.



5. AVEC L'ARIDITÉ CROISSANTE du Sahara (voir la vue du versant oriental du massif de l'Acaïcus, en Libye, en haut), les plantes sauvages qui constituaient une ressource alimentaire deviennent rares. Les habitants du Sahara utilisent l'eau des oasis pour cultiver des espèces tel le sorgho, et ils domestiquent les bovins. Ces derniers apparaissent dans l'art rupestre notamment à Uan Amil (en bas)

On pensait que l'agriculture prospère de la vallée du Nil avait été importée du Proche-Orient. En fait, pendant la phase aride de la fin de l'Holocène, de plus en plus d'habitants du désert se déplacent vers les zones riches en eau et apportent avec eux leurs outils agricoles et leur connaissance des rythmes de croissance et de maturation des plantes. Ce n'est que plus tard que les espèces

végétales égyptiennes, plus pauvres que celles du Proche-Orient, cèdent la place aux espèces importées de Palestine puis de Syrie, quand les premières communautés du Fayoum, de Mérimdé et de Badari font de l'agriculture leur principale ressource économique. Néanmoins, l'agriculture fondement de l'organisation de l'État égyptien, est née dans le Sahara alors fertile.

Barbara BARICH est professeur d'ethnographie préhistorique africaine à l'Université de Rome. Enrico BARICH s'occupe du Forum de l'archéologie et de l'héritage culturel africains.

Barbara BARICH, *People, Water and Grains : The Beginnings of Domestication in the Sahara and the Nile Valley*, l'Ermanli Breschneider, Rome (à paraître).

Barbara BARICH, *Archaeology and Envi-*

ronment in the Libyan Sahara, bar, International Series 368, Oxford, 1987.

F. WENDORF, R. SCHILD et A.E. CLOSE, *The Prehistory of Wadi Kubbaniya*, SMU Dallas, 1989.

F. KLEES et R. KUPER, *New Light on the Northeast African Past*, in *Africa Praehistorica* 5, Colonia, 1992.

J. SANSONI, *Le Più antiche pitture del Sahara*, Jaca Book, Milan, 1994.

La représentation de l'esprit chez l'enfant

ANNE-MARIE MELOT

Les tout jeunes enfants ignorent que la vérité n'est pas absolue.

Vers cinq ans, ils commencent à admettre que les autres peuvent interpréter une scène d'une autre façon qu'eux-mêmes, et à concevoir que chacun a sa propre représentation de la réalité physique et sociale.

Depuis le début des années 1980, de nombreuses recherches sur la façon dont l'enfant conçoit la vie mentale se sont développées.

L'étude des « théories de l'esprit humain », c'est-à-dire de la capacité à prédire et à expliquer un comportement par des états mentaux inobservables, ont commencé avec l'étude des comportements spontanés des primates non humains, lesquels ont révélé des capacités sociales complexes, symptomatiques de certaines capacités de l'esprit. L'étude de ces primates soulève diverses questions : peut-on avoir une compréhension implicite d'états mentaux tels que la connaissance, l'ignorance ou la croyance ? C'est-à-dire quelle est notre représentation mentale du fait que « Je sais qu'il sait ce que je sais », ou « Je sais qu'il ignore ce que je sais », ou « Je sais qu'il croit cela, mais que c'est faux ».

Carrefour pluridisciplinaire, l'étude des théories de l'esprit concerne, outre la psychologie, des disciplines qui relèvent des sciences cognitives, telles la linguistique, la philosophie de l'esprit, la philosophie du langage et l'épistémologie ; on y mène des recherches sur le sens, sur l'intention

nalité, sur les processus individuels et culturels de construction des croyances et des savoirs. Cette étude des théories de l'esprit relève aussi de plusieurs sous-disciplines de la psychologie, notamment celle des maladies « de l'esprit » telles que l'autisme et la schizophrénie ; la psychologie ani-

male avec les recherches sur les primates ; et la psychologie du développement avec les recherches sur l'enfant menées dans une perspective développementale classique ou suivant une approche comparative.

Aujourd'hui, un important courant de la psychologie du développement rassemble, désigné par le terme de théorie de l'esprit, les chercheurs qui étudient la compréhension qu'ont les enfants, à différents moments de leur développement, des entités et des phénomènes mentaux. Pour reprendre les termes de John Flavell, de l'Université Stanford, l'un des pionniers en ce domaine : « les chercheurs en théorie de l'esprit essaient de mettre en évidence ce que les enfants savent à propos de l'existence et du fonctionnement de différents types d'états mentaux, et aussi ce qu'ils savent de la façon dont ces états mentaux sont reliés de façon causale, avec les entrées perceptives, avec les sorties comportementales et avec les autres états mentaux ».

Pour certains psychologues, les théories de l'esprit évoluent comme les théories scientifiques : les contre-exemples sont tout d'abord ignorés



raient comme des artefacts ; puis des hypothèses auxiliaires adéquates sont formulées, afin de rendre compte de quelques faits qui apparaissent dans un contexte particulier. Enfin, on construit un nouveau modèle qui s'applique aussi aux résultats que l'ancienne théorie n'expliquait pas : il est compatible avec les faits que justifiait la théorie initiale, mais aussi avec ceux qui ont participé à sa déstabilisation.

Les connaissances précoces

Il ressort des études menées en psychologie du développement, d'une part, que les jeunes enfants disposent, très tôt, de connaissances et de représentations relatives aux entités de la vie mentales et, d'autre part, que ces connaissances évoluent notablement entre deux et six ans. Ainsi, les enfants d'âge préscolaire sont capables de distinguer clairement entre entités mentales et entités physiques, d'attribuer divers états mentaux aux êtres humains, y compris à eux-mêmes, d'utiliser, dans leur langage spontané, certains termes qui se réfèrent à différents états mentaux, par exemple. Les enfants d'âge préscolaire sont également capables de préciser certains types de relations entre le monde extérieur et l'esprit : par exemple, ils comprennent que la perception de tel ou tel objet, de tel ou tel événement conduit à un savoir sur l'«état du monde», et ils sont capables d'expliquer et de prédire certaines actions liées à un état mental particulier, tel un désir ou une intention.

Pour objectives que soient ces connaissances précoces, leur statut n'en est pas moins l'objet de vifs débats dans la communauté des psychologues de l'enfant, principalement sur le sens qu'il convient de leur accorder quant au type de théorie de l'esprit qu'elles révéleraient. Tout le débat est sous-tendu par une question cruciale : les enfants qui font référence à des entités mentales, c'est-à-dire à des représentations, les conçoivent-ils comme telles? Non pas comme des copies pures et simples du réel, mais comme les produits d'activités men-

2. ALICE, dans le conte de Lewis Carroll, *De l'autre côté du miroir*, ne différencie pas la réalité de l'imaginaire. D'après les études menées sur des enfants par différents psychologues, le passage d'une représentation erronée à une représentation plus fidèle de la réalité se ferait vers cinq ans.

ales exercées à propos du réel. Lorsque tel est le cas, ils sont en mesure de concevoir que les représentations mentales sont des constructions, des interprétations, des transformations et, le cas échéant, des distorsions des informations portant sur tel ou tel état de la réalité. En d'autres termes, la théorie de l'esprit est alors fondée sur des concepts de métareprésentation (ils se représentent des représentations) et de misreprésentation (ils savent que certaines représentations peuvent être fausses).

Pour répondre à ces questions, les psychologues étudient si l'élaboration de ces concepts résulte d'un changement brutal ou d'une évolution graduelle? Ce changement est-il l'aboutissement d'une séquence de développement unique? Grâce à quelles situations expérimentales et à quels critères peut-on le mettre en évidence?

Les fausses croyances

On admet généralement qu'un enfant a accès à une théorie de l'esprit quand il sait distinguer une proposition telle que «il est vrai que...» d'une autre telle que «je crois que..., je pense que...». Dans les tâches d'inférence de fausses croyances, dont nous allons donner des exemples. Ainsi, en 1983, Heinz Wimmer et Josef Perner, de l'Université de Salzbourg, ont cherché à savoir si les enfants s'expliquent les conduites des personnes non pas d'après l'état objectif de la réalité physique et sociale mais en référence à des représentations – éventuellement fausses – que les personnes ont de cette réalité.

Ainsi, H. Wimmer et J. Perner ont proposé à des enfants âgés de trois à huit ans différents scénarios où l'objectif de la recherche à savoir si l'enfant peut faire abstraction de ce qu'il sait et imaginer



es réactions d'une personne qui n'a pas nécessairement les mêmes informations que lui. Par exemple, on présente à l'enfant deux poupées (représentant respectivement un petit garçon – Maxi – et sa maman), un morceau de plastique représentant une tablette de chocolat et deux boîtes – l'une rouge et l'autre bleue, qui représentent des placards de cuisine. Puis l'adulte joue devant l'enfant spectateur la scène suivante : Maxi et sa maman reviennent de faire les courses et les rangent dans la cuisine. Maxi place le chocolat dans le placard bleu (c'est le lieu initial), puis sort de la pièce pour aller jouer dehors. Lorsqu'il est parti, la maman de Maxi utilise une partie du chocolat pour faire un gâteau et range le reste dans le placard rouge (lieu final). Maxi revient. L'enfant a faim et veut manger du chocolat. L'adulte pose alors à l'enfant témoin du déroulement de ce scénario la question suivante : « Montre-moi où Maxi va aller chercher le chocolat : dans le placard bleu ou dans le placard rouge ? » (voir la figure 3).

Jusqu'à cinq ans environ, les enfants répondent quasi invariablement à cette question en désignant le lieu final (le placard rouge). En produisant cette réponse, les enfants se réfèrent à l'état de la réalité et/ou à la représentation qu'ils en ont eux-mêmes (le chocolat

a été déplacé : il est maintenant dans le placard rouge), sans considération du fait que Maxi, n'ayant pas été témoin de ce déplacement, devrait avoir une représentation différente de la situation, en l'occurrence croire, à tort, que l'objet recherché se trouve encore dans le placard bleu, où il l'a initialement placé. En revanche, les enfants de cinq à six ans qui désignent invariablement le placard bleu (lieu initial) en réponse à la question de savoir où Maxi va aller chercher le chocolat, présument – à juste titre – que, privé d'une information essentielle en raison de son absence, Maxi a, sur l'état du monde (il est vrai que le chocolat est dans le placard rouge) une fausse croyance (il croit que le chocolat est dans le placard bleu) ; les enfants prennent en compte cette fausse croyance pour prédire son action (il ira chercher le chocolat dans le placard bleu).

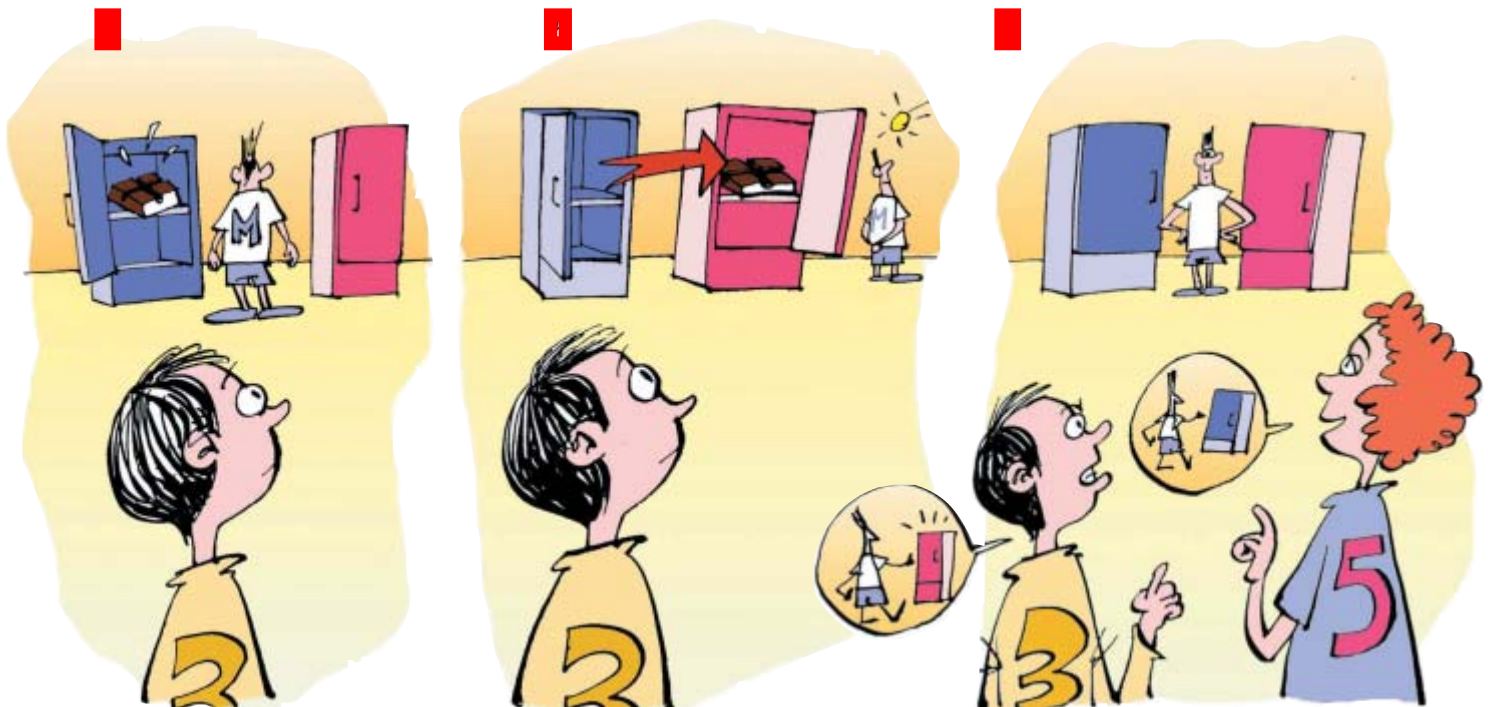
L'incapacité des enfants les plus jeunes à concevoir qu'autrui peut avoir une propos d'un objet ou d'un événement une croyance (une représentation) qui diffère de l'état de la réalité et/ou de ce qu'ils en connaissent ou de ce qu'ils croient eux-mêmes apparaît aussi dans la résolution d'épreuves supposées plus simples à traiter.

Citons la situation imaginée, elle-même aussi, par H. Wimmer, J. Perner et

leurs collègues, où l'enfant, mis en présence d'une boîte familière dont le contenu a été modifié à son insu, doit répondre à plusieurs questions de l'adulte. Ainsi, l'adulte présente à l'enfant une boîte familière fermée (par exemple, une boîte de bonbons Smarties) et lui demande ce qu'il croit qu'elle contient : « Des Smarties ? » répond l'enfant, sans hésitation. L'adulte ouvre alors la boîte, et l'enfant doit constater qu'elle contient, en réalité, un stylo. Ayant refermé la boîte, l'adulte demande alors à l'enfant ce qu'un autre enfant qui arriverait dans la pièce après que l'on a refermé la boîte, croirait qu'elle contient, un stylo ou des Smarties ?

Chocolat ou Smarties

Les psychologues avaient émis l'hypothèse que l'enfant réussirait mieux car cette situation n'implique pas, comme dans l'expérience « Maxi et le chocolat », de mémoriser plusieurs aspects critiques du déroulement d'un scénario. De surcroît, l'expérience aurait dû être plus facile, puisque l'enfant avait été lui-même confronté à l'expérience préalable d'une fausse croyance (la boîte ne contient pas ce qu'il s'attendait à y trouver). Il n'en est rien. Ici encore, les enfants les plus



3. L'INFERENCE DE FAUSSES CROYANCES : un enfant observe que l'on place une tablette de chocolat dans le placard bleu. Un petit personnage nommé Maxi est aussi témoin de la scène (a). Puis, en l'absence de Maxi, on change la tablette de chocolat de placard, pour le placer dans le rouge (b). Maxi revient, et l'on interroge l'enfant : dans

quel placard Maxi va-t-il chercher le chocolat ? L'enfant de trois ans répond : « Dans le rouge. » Il sait que le chocolat s'y trouve et n'ignore pas que Maxi puisse l'ignorer. En revanche, un enfant de cinq ans distingue ce que lui-même sait et ce que savent les autres : Maxi ignore que le chocolat a été déplacé et ouvrira le placard bleu (c).



4. UNE AUTRE EXPERIENCE permet de mettre en évidence l'inférence des fausses croyances. On présente à un enfant une boîte de bonbons Smarties. Puis on ouvre la boîte et on lui montre que, contrairement à ce qu'il attendait, elle ne contient pas de bonbons, mais un stylo. Puis on referme la boîte et on lui demande si un autre enfant qui

entrerait maintenant dans la pièce croirait que la boîte contient des bonbons ou un stylo. L'enfant de trois ans répond que le nouvel arrivant pense trouver un stylo, ce que lui-même sait, mais que le deuxième enfant ignore, et que lui-même ignorait avant que l'on ouvre la boîte. Un enfant de cinq ans répond : « Des Smarties ».

jeunes (âgés de moins de cinq ans) répondent en se référant à leur propre représentation de la réalité : ils disent que leur partenaire va croire que la boîte contient un stylo, ce qu'eux-mêmes savent, mais que le deuxième enfant ignore (voir la figure 4).

Pas plus qu'ils ne comprennent que deux personnes – eux-mêmes et autrui – peuvent avoir des représentations différentes d'un même état de la réalité, ces jeunes enfants ne réalisent pas que leurs propres représentations peuvent changer au cours du temps, notamment après qu'ils ont reçu une information nouvelle. Ainsi, quand après l'avoir confronté au contenu trompeur d'une boîte familière (un stylo dans une boîte de Smarties, par exemple), on demande à l'enfant de dire ce qu'il croyait que la boîte contenait avant qu'elle soit ouverte et que son contenu réel soit dévoilé, il répond « Un stylo », se référant à l'état de la réalité et à la représentation actuelle qu'il en a, et non pas à son état mental antérieur, c'est-à-dire à sa propre fausse croyance.

La difficulté intrinsèque que rencontrent les épreuves imaginées par H. Wimmer et J. Perner réside dans le fait que, pour les résoudre, pour inférer une fausse croyance, l'enfant doit attribuer diverses valeurs de vérité aux différentes représentations mentales qu'ont les protagonistes d'une seule et même situation.

Cela implique de concevoir qu'un même état du monde peut faire l'objet de représentations mentales diverses aussi variées que les activités mentales

des personnes confrontées à cet état. En d'autres termes, cela implique une conception représentationnelle de la vie mentale des personnes, une théorie représentationnelle de l'esprit qui « fabrique » de multiples représentations, éventuellement contradictoires de la réalité. C'est sur la base de cette analyse que la compréhension de la croyance, telle qu'elle est attestée par la capacité à concevoir une fausse croyance, constitue le concept central d'une théorie représentationnelle de l'esprit.

De multiples représentations d'un même objet

Les situations expérimentales d'inférence d'une fausse croyance ont permis de recueillir un ensemble de données cohérentes : c'est seulement aux alentours de cinq ans que les enfants prédisent les actions manifestes des personnes en se référant aux croyances que ces personnes ont sur la situation. Ils sont ainsi en mesure de prédire l'action, en apparence paradoxale, d'une personne qui, désirent trouver un objet, va le chercher dans un endroit où il ne se trouve pas : parce que cette personne agit en fonction de sa représentation – fausse, mais qu'elle tient pour vraie – de la localisation actuelle de l'objet qu'elle recherche. De surcroît, il est très difficile, voire impossible, d'obtenir, dans les tâches d'inférence d'une fausse croyance, des réussites plus précoces que celles déjà mentionnées dans les diverses tentatives de facilitation

simplification des consignes et/ou du scénario, entraînement, rôle actif de l'enfant dans le déroulement du scénario, etc.) se sont soldées par des échecs.

Ainsi, la réussite aux tâches de fausses croyances dénote l'accès à la métareprésentation (l'enfant se représente la représentation qu'une autre personne a d'une situation donnée) et les données recueillies plaident en faveur d'un changement notable aux alentours de cinq ans.

Un second type d'argument à l'appui de cette hypothèse vient de la comparaison des situations de fausses croyances et d'autres épreuves où il est nécessaire, pour réussir, de comprendre que les représentations ne sont pas des caractéristiques intrinsèques et intangibles des objets et des événements, mais qu'elles dépendent du traitement auquel on les soumet. Il en va ainsi, par exemple, de deux types d'épreuves que nous allons décrire et qui reflètent respectivement la coordination des points de vue, et la distinction entre apparence et réalité.

Les premières de ces expériences révèlent la capacité de concevoir que si des individus différents ont des points de vue différents sur un objet donné, ils ont, de ce fait, des représentations visuelles différentes de cet objet ; les secondes indiquent la capacité de concevoir le fait qu'un seul et même individu peut avoir plusieurs points de vue et, par conséquent, plusieurs représentations (plusieurs croyances), éventuellement contradictoires, à propos d'une seule et même réalité.

Perspectives visuelles et points de vue

Quelle expérience révèle que l'on conçoit que deux personnes peuvent avoir des représentations différentes d'un même objet? Imaginons un adulte et un enfant de trois à quatre ans assis face à face. Sur la table qui les sépare est posé le dessin d'un objet (un livre ouvert, par exemple) ou d'un animal (une tortue, par exemple). L'un des deux protagonistes voit ce dessin à l'endroit, tandis que l'autre le voit à l'envers ; chacun d'eux est capable de préciser comment lui-même voit ce dessin, quelle représentation il a du livre ou de la tortue. En revanche, quand on demande à l'enfant si l'adulte voit le dessin à l'endroit ou à l'envers, on constate que l'enfant de trois à quatre ans lui attribue son propre point de vue : ayant déclaré, sans hésitation et avec exactitude, que lui-même voit la tortue à l'endroit, par exemple, il déclare, sans plus d'hésitation, mais, cette fois, de façon erronée, que son partenaire, en face de lui, voit aussi la tortue à l'endroit. Au contraire, un enfant de cinq ans, soumis aux mêmes questions dans les mêmes conditions, répond

correctement. Cette situation a été proposée par J. Flavell et ses collègues à un grand nombre d'enfants âgés de trois à cinq ans. Les données recueillies conduisent à un double constat : autant ce problème apparaît trivial pour les enfants les plus âgés, qui le réussissent systématiquement, autant il présente une difficulté intrinsèque et quasi insurmontable pour les enfants les plus jeunes, qui échouent systématiquement.

Pour coordonner les perspectives et les points de vue qu'ont plusieurs individus d'une seule et même réalité, il faut être en mesure de concevoir que cette partie du réel peut donner lieu à des représentations différentes, en l'occurrence chez des individus dont les points de vue diffèrent. Il semble que cela soit hors de la portée des enfants les plus jeunes, comme s'ils considéraient que la représentation d'un objet est l'une de ses caractéristiques essentielles et intangible, et non pas un point de vue parmi d'autres sur cet objet. Suivant cette analyse, la réussite des enfants de cinq ans à l'épreuve de coordination des perspectives visuelles et des points de vue pourrait être l'indice d'un progrès métacognitif impor-

ant : la capacité à traiter les représentations comme telles, c'est-à-dire l'accès à une conception représentationnelle de la vie mentale.

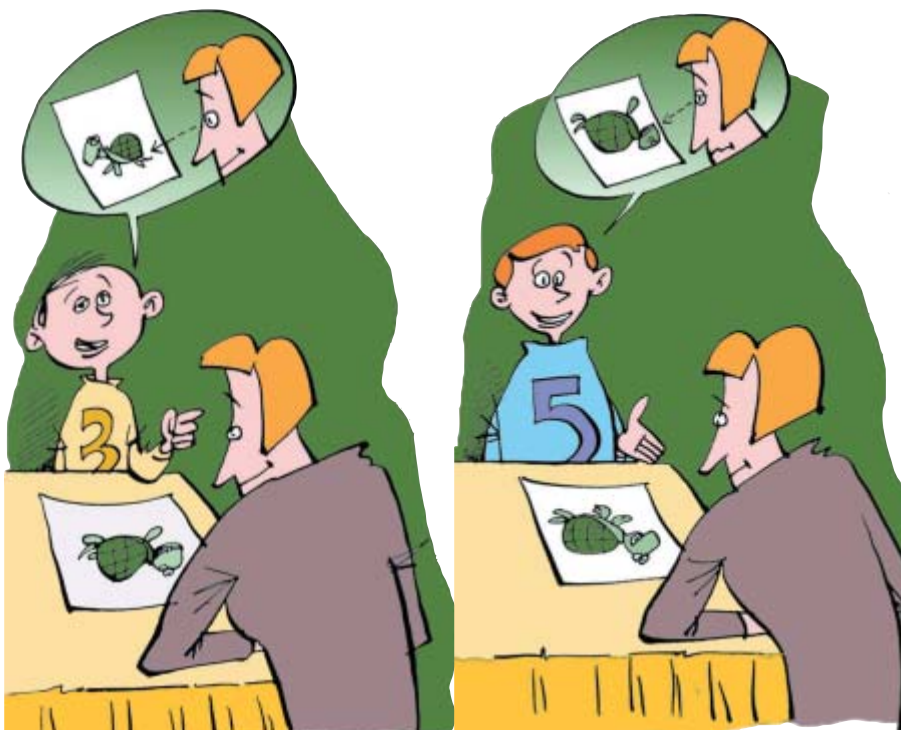
Distinction entre apparence et réalité

Nous allons maintenant décrire une nouvelle expérience qui montre que l'on peut concevoir qu'une même personne peut avoir plusieurs représentations contradictoires d'une seule et même réalité.

Imaginons que l'on montre à un enfant de trois à quatre ans un objet trompeur, par exemple une éponge qui ressemble à un caillou ou une boîte qui ressemble à un livre. Dans ce dernier cas, à la seule vue de l'objet, l'enfant déclare qu'il s'agit d'un livre ; après quoi, il est invité à manipuler l'objet et constate qu'il s'agit d'une boîte. On lui pose alors une question sur l'identité de l'objet : «Est-ce vraiment une boîte ou est-ce vraiment un livre?» et une question sur son apparence : «Quand on regarde cet objet, est-ce qu'il ressemble à un livre ou à une boîte?»

Dans la majorité des cas, les enfants de trois à quatre ans produisent la même réponse à ces deux questions, et déclarent soit, «En vrai, c'est une boîte» en réponse à la première question, et «Cela ressemble à une boîte» en réponse à la seconde question. Ou : «En vrai, c'est un livre» en réponse à la première question et «Cela ressemble à un livre» en réponse à la seconde question. Dans le premier cas, on parle d'erreur réaliste ; dans le second, d'erreur phénoméniste. Dans les deux cas, il s'agit d'une incapacité à distinguer l'apparence et la réalité.

J. Flavell a observé les réactions d'enfants âgés de trois à six ans et, ici encore, les données recueillies ont permis de mettre en évidence une différence radicale entre les enfants les plus jeunes (trois à quatre ans), qui échouent quasiment systématiquement à distinguer l'apparence et la réalité de ces objets trompeurs, et les enfants de plus de cinq ans, qui, eux, y parviennent. L'incapacité manifeste des enfants de trois à quatre ans à réfléchir sur l'apparence et sur la réalité pourrait bien renvoyer aussi à un déficit métareprésentationnel du même type que celui évoqué à propos de l'incapacité à coordonner les points de vue de plusieurs personnes sur une même réalité. Cette incapacité s'exerce aussi au plan individuel, quand



5. L'ÉPREUVE DES POINTS DE VUE est également réussie par les enfants de cinq ans, mais pas par les enfants plus jeunes. Dans cette expérience, l'enfant et un adulte sont assis face à face. On pose sur la table un dessin, par exemple celui d'une tortue. On demande à l'enfant s'il voit le dessin à l'endroit ou à l'envers et il répond toujours correctement. En revanche, quand on lui demande comment l'adulte voit le dessin, il répond «à l'endroit» quand il a moins de cinq ans (à gauche), et il répond «à l'envers» à partir de cinq ans (à droite).



5. APPARENCE ET REALITE diffèrent parfois. Dans cette expérience, on présente aux enfants les objets d'apparence trompeuse. Ainsi on montre un objet qui a l'apparence d'un livre et quand on demande à l'enfant de dire ce dont il s'agit, il répond : «C'est un livre» (a). Puis on lui donne l'objet à manipuler, et il constate qu'il peut s'ouvrir : en fait, il s'agit d'une boîte qui a l'apparence d'un livre (b). Après cette expérience, on montre à nouveau à l'enfant l'objet en lui demandant si, finalement, c'est un livre ou si c'est une boîte. Un enfant de trois ans répond que c'est un livre (c), incapable d'admettre que l'apparence est parfois trompeuse et de se servir de l'expérience acquise (c'est une boîte). En revanche, l'enfant de cinq ans accente que, malgré l'apparence, l'objet est bien une boîte (d).

On doit concevoir que l'on peut, soit même, avoir deux représentations contradictoires d'un même objet, en l'occurrence croire que l'objet ambigu représente un livre, quand on le regarde et croire aussi qu'il représente une boîte quand on le touche.

Les épreuves expérimentales où les enfants ont à inférer de fausses croyances, à coordonner les points de vue et à distinguer entre apparence et réalité présentent une évidente parenté. Il semble que les performances moyennes réalisées par divers échantillons d'enfants d'âge préscolaire se développent de pair : ces différentes épreuves sont *grosso modo* réussies aux mêmes âges ; il est également difficile d'obtenir des réussites beaucoup plus précoces et, enfin, les performances s'améliorent avec l'âge.

La hiérarchisation des tests

Ainsi, les relations entre épreuves de coordination des points de vue, distinction entre apparence et réalité, et inférence de fausses croyances constituent un nouvel argument en faveur d'un changement radical des capacités métareprésentationnelles des enfants vers l'âge de cinq ans. Cependant, une analyse plus approfondie des performances et de leur évolution apporte de nouveaux éléments à l'étude du développement des théories de l'esprit.

Toutes ces épreuves sont-elles équivalentes, interchangeables du point de

vue de l'évaluation des compétences représentationnelles ? Sont-elles hiérarchisées ? Comment peut-on relier leur maîtrise et le développement ? Nous avons tenté de répondre à ces questions en faisant subir aux mêmes enfants les trois épreuves décrites précédemment, en analysant les scores moyens, mais aussi les performances individuelles, et enfin en étudiant si ces épreuves sont indépendantes, équivalentes ou hiérarchisées.

Dans une première étude, nous avons constitué trois groupes de 24 enfants âgés respectivement de trois à quatre ans, quatre à cinq ans et cinq à six ans. Nous avons proposé aux enfants, examinés individuellement, quatre tâches de coordination des points de vue (du même type que la tortue observée à l'endroit ou à l'envers), quatre tâches de distinction entre apparence et réalité (telle la boîte qui ressemble à un livre) et quatre tâches d'inférence de fausses croyances (comme dans l'exemple de Maxi et du chocolat). L'analyse des performances moyennes fait apparaître une augmentation notable, avec l'âge, du nombre de réussites aux trois épreuves ainsi que d'étroites corrélations entre ces épreuves, à chaque âge. Toutefois, l'épreuve de coordination des points de vue a un taux de réussite notablement supérieur à chacune des deux autres.

L'analyse des performances individuelles révèle que les épreuves supposées tester l'accès à la méta-



représentation ne sont pas toutes les trois équivalentes. Ainsi, la réussite lors des tests de distinction entre apparence et réalité et la réussite en inférence de fausses croyances présupposent l'une et l'autre la réussite préalable dans les tâches de coordination des points de vue. En d'autres termes, de nombreux enfants réussissent l'épreuve de coordination des points de vue et échouent dans les deux autres, mais on n'observe jamais le résultat inverse (échec lors de l'épreuve de coordination des points de vue et réussite dans la distinction entre apparence et réalité et/ou dans l'inférence de fausses croyances).

Enfin, la généralisation du traitement métareprésentationnel s'effectue suivant deux «chemins de développement» différents : environ 75 pour cent des enfants réussissent d'abord la tâche de coordination des points de vue, puis la distinction entre apparence et réalité, et enfin l'inférence de fausses croyances, tandis que les autres enfants réussissent d'abord les tâches de coordination des points de vue, puis l'inférence de fausses croyances et enfin la distinction entre apparence et réalité.

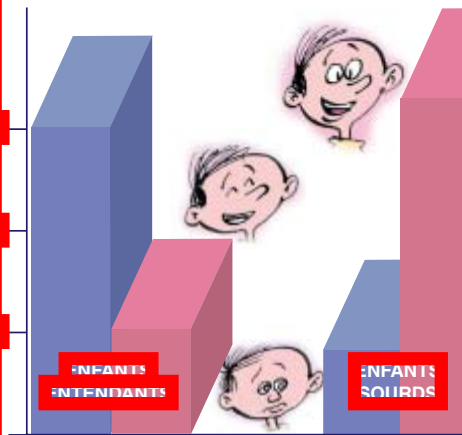
Lors d'un autre type d'études, nous avons proposé les trois épreuves, une fois par mois pendant six mois, à six groupes de 24 enfants dont l'âge moyen variait de six mois en six mois (ils avaient entre trois ans et demi et six ans lors de la première observation). On a confirmé que la première tâche systématiquement réussie est celle de la coordination des points de vue. Par ailleurs, nous retrouvons les deux «chemins de développement».

Trois enfants sur quatre maîtrisent les épreuves dans l'ordre : tâche de coordination des points de vue, distinction entre apparence et réalité, puis inférences de fausses croyances, tandis qu'un quart des enfants empruntent le second chemin, réussissant l'épreuve d'inférence de fausses croyances avant celle de distinction entre l'apparence et l'identité réelle d'objets trompeurs.

Enfin, Cyril Courtin, dans notre laboratoire, a comparé des enfants entendants d'une part, et des enfants sourds de deuxième génération, c'est-à-dire dont la langue maternelle est la langue des signes, d'autre part. Il avait postulé que l'exposition précoce à la langue des signes chez les enfants sourds de deuxième génération favorise l'accès à la métareprésentation. En effet, en raison des caractéristiques syntaxiques de la langue des signes, sa pratique constituerait un entraînement précoce et permanent des signeurs aux changements et aux coordinations des perspectives et des points de vue qui semblent nécessaires à la construction et à la manipulation des métareprésentations. Cette hypothèse a été confirmée : les enfants sourds de deuxième génération sont plus performants, à l'âge égal, que les enfants entendants pour ce qui est de la résolution des tâches d'inférence de fausses croyances.

Toutefois, ces enfants empruntent, pour la plupart, le chemin de développement le moins fréquenté par les enfants entendants, c'est-à-dire qu'ils réussissent d'abord à la tâche de coordination des points de vue, puis à l'inférence des fausses croyances et enfin, à la distinction entre apparence et réalité. Nous avons ainsi montré que les chemins de développement des enfants sourds qui utilisent la langue des signes et des enfants entendants semblent inversés.

INCH : IROE : I : SIERE



7. LES ENFANTS SOURDS pratiquant la langue des signes (à droite) ne réussissent pas dans le même ordre que les enfants entendants (à gauche) les tests proposés : la majorité d'entre eux réussit d'abord les tests d'inférence de fausses croyances (l'expérience Maxi et le chocolat rose), tandis que les enfants entendants réussissent d'abord les tests de distinction entre apparence et réalité (l'expérience du livre-boîte) (en bleu).

Les chemins du développement

L'ensemble de ces résultats conduit à considérer la coordination des perspectives visuelles comme une première étape de l'accès à la métareprésentation et à s'interroger sur les modalités de généralisation de cet acquis à d'autres contextes où intervient le traitement des croyances.

Sur le premier point, la précocité de l'accès à la métareprésentation dans le cadre de la coordination des perspectives visuelles conduit à penser que ces situations constituent vraisemblablement un contexte limité propice à l'élaboration, par l'enfant, d'hypothèses auxiliaires, dans l'élaboration et l'évolution de sa théorie de l'esprit. Sur le second point, à savoir que la généralisation de la notion de métareprésentation à d'autres domaines du fonctionnement psychologique semble emprunter des chemins de développement variables selon les individus

il conduit à s'interroger sur le statut des réussites aux différentes épreuves. Il conduit par là même à discuter du choix des situations et des critères à retenir pour évaluer la capacité des jeunes enfants à effectuer un traitement métareprésentationnel des situations qu'ils rencontrent et, pourquoi pas, à reconsidérer le statut de marqueur exclusif couramment accordé à cet égard à l'épreuve d'inférence de fausses croyances.

En résumé, l'hypothèse d'un changement radical dans la conception que se font les enfants de cinq à six ans du fonctionnement mental des êtres humains a constitué, pendant une quinzaine d'années environ, l'épine dorsale d'un extraordinaire foisonnement de recherches menées en psychologie du développement, sur les théories naïves de l'esprit. Aujourd'hui, le paysage change et de nouvelles questions – interdépendantes – émergent.

Quelle est la séquence développementale au terme de laquelle l'enfant accéderait à la métareprésentation ? Quels rapports entretiennent les deux capacités spécifiquement humaines que sont l'intentionnalité et le langage considéré sous ses divers aspects syntaxique, sémantique et pragmatique ? Quelles sont les conditions susceptibles de faciliter, ou au contraire d'entraver, le traitement métareprésentationnel par les enfants des situations qu'ils rencontrent qu'il s'agisse de conditions liées aux caractéristiques des individus ou de celles liées aux contextes dans lesquels ils évoluent ? Se pose aussi, et la liste n'est pas close, la question, fort peu étudiée jusqu'à présent, de l'évolution des théories de l'esprit au-delà de l'enfance, chez l'adolescent et l'adulte.

A.M. MELOT est chargée de recherche au CNRS dans l'Équipe développement et fonctionnement cognitifs, GIN 6095, CNRS-CEA-Universités de Caen et Paris 5.

J. PERNER, *Understanding the representational mind*, MIT Press, 1991.

J. ASTINGTON, *The child's discovery of the mind*, Harvard University Press 1993.

A. GOPNIK, H. WELLMAN, *The theory theory*, in *Mapping the mind : Domain specific*

specificity in cognition and culture, sous la direction de L. Hirschfeld et S. Gelman, pp. 257-293, Cambridge University Press, 1994.

J. FLAVELL, *Cognitive development : Children's knowledge about the mind*, in *Annual Review of Psychology*, vol. 50, pp. 21-45, 1999.

Comment l'esprit vient aux enfants. Le développement d'une théorie de l'esprit sous la direction de A.M. Melot et J. Nadel. Enfance, n° 3. PUF, 1999.

Jeûner l'estomac plein

MICHEL GAUTHIER-CLERC • YVON LE MAHO • YVES HANDRICH

Le manchot royal conserve de la nourriture dans son estomac pendant l'incubation pour nourrir le poussin à l'éclosion.

Les oiseaux pélagiques, tels les manchots et les albatros, se nourrissent en haute mer. Leurs sites d'alimentation sont situés à plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de kilomètres de leur site de reproduction. Non seulement ces sites sont dispersés, mais les ressources alimentaires y sont parfois faibles ou inexistantes (les quantités de nourriture disponible sur ces sites varient de façon irrégulière et imprévisible). Dans ces conditions, comment les oiseaux font-ils pour rapporter de la nourriture à leur poussin ? Ils la transportent dans leur estomac sur de très longues distances. L'apport de nourriture est donc limité à la fois en fréquence et en volume. Ces contraintes deviennent critiques au moment de l'éclosion, où le poussin doit être rapidement alimenté par ses parents pour survivre.

Dans le cadre d'un programme d'étude de l'écologie des oiseaux pélagiques de l'Institut français pour la recherche et la technologie polaires, nous avons étudié la stratégie qu'adopte le manchot royal (*Aptenodytes patagonicus*) pour nourrir le poussin à l'éclosion : les mâles qui couvent leur œuf sont capables de conserver de la nourriture dans leur estomac pendant plusieurs semaines tout en jeûnant, nourriture qu'ils régurgitent pour le poussin si la femelle n'est pas encore revenue de son voyage en mer lors de l'éclosion. Ainsi, l'animal se transforme en garde-manger pour anticiper les conséquences de variations dans les ressources marines.

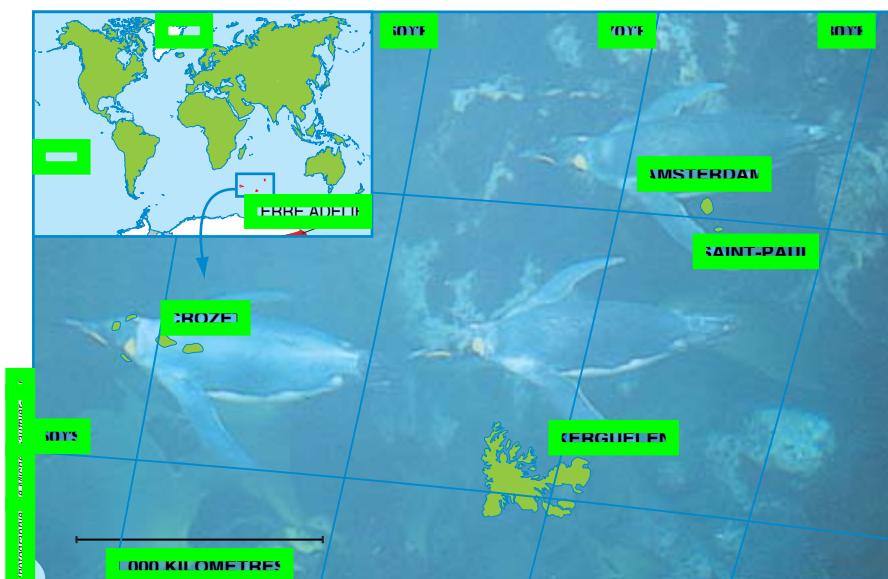
Les manchots sont des oiseaux qui ne volent pas : au cours de leur évolution à partir d'ancêtres volants, ils ont perdu cette capacité, car ils se sont

remarquablement adaptés à la vie marine. Peu habiles sur la terre ferme, les manchots n'y viennent que pour se reproduire ou muer (les manchots changent de plumage tous les ans) et sont alors obligés de jeûner.

Les parents se relaient pour couvrir

On compte 17 espèces de manchots vivant dans l'hémisphère australe (contrairement aux pingouins, qui vivent dans l'hémisphère boréal). Les manchots ont développé une panoplie de stratégies originales pour s'adapter aux contraintes liées à leur environnement et au succès de leur reproduction. Certaines espèces, tels le manchot empereur (*Aptenodytes forsteri*) et le manchot royal, jeûnent à terre pendant plusieurs mois, passant d'un état d'obésité à un état de maigreur extrême. En mer, ces deux espèces parcourent des milliers de kilomètres et sont capables de plonger à 300 mètres de profondeur pendant plus de six minutes pour se nourrir, grâce à différents mécanismes physiologiques tels un abaissement de 20 °C de la température abdominale, qui passe de 38 °C à 18 °C environ, entraînant une réduction de la consommation d'oxygène et donc un prolongement de la durée de la plongée. Le manchot empereur est le seul oiseau qui se reproduit pendant l'hiver antarctique : en se regroupant, les mâles (qui couvent l'œuf pendant toute la durée de l'incubation, contrairement au cas du manchot royal, où les parents se relaient) minimisent leur dépense énergétique.

L'archipel de Crozet est composé de cinq îles isolées au milieu de l'océan Indien, à mi-distance entre les continents



L'ARCHIPEL CROZET abrite la moitié de la population mondiale de manchots royaux



2. CES MANCHOTS ROYAUX DES ILES CROZET reviennent de leur voyage alimentaire en mer. Pendant la période d'incubation de l'œuf, qui dure 54 jours, les parents se relaient : l'un couve l'œuf en vivant sur ses réserves corporelles, tandis que son partenaire entreprend un voyage en mer de deux à trois semaines pour se nourrir. S'il revient pendant les trois semaines qui précèdent l'éclosion, comme celle-ci risque de se produire au cours de son tour d'incubation, il stocke de la nourriture dans son estomac pour le poussin.

africain et antarctique (voir la figure 1). Il abrite environ 25 millions d'oiseaux marins, dont près de la moitié de l'effectif mondial du manchot royal. Les manchots royaux mesurent environ 90 centimètres de hauteur et pèsent quelque 13 kilogrammes à l'âge adulte. Ce sont les plus grands oiseaux pélagiques après les manchots empereurs. Pour se reproduire, les manchots royaux se réunissent en colonies de plusieurs centaines de milliers de couples. Les adultes vivent parfois plus de 20 ans, mais ils ont un faible succès reproducteur : chaque année, seule une minorité de la population parvient à mener à son terme l'élevage du poussin, qui dure dix mois. Au sein d'une même colonie, les pontes ne sont pas synchrones. Elles ont lieu de novembre à février. Les manchots royaux ne construisent pas de nid. Ils couvent leur œuf unique, posé sur leurs pattes et recouvert par la peau du bas de l'abdomen (voir la figure 3). Les deux conjoints se relaient pendant les 54 jours



3. LES MANCHOTS COUVENT LEUR ŒUF UNIQUE posé sur leurs pattes et protégé par la peau du bas de leur abdomen

d'incubation : tandis que l'un couve l'œuf en vivant sur ses réserves corporelles, son partenaire entreprend un voyage en mer de deux à trois semaines pour se nourrir, principalement de poissons de la famille des myctophidés (de petits poissons fluorescents qui vivent en profondeur) et de calmars.

Le bol alimentaire se conserve

Les écophysiologistes ont suivi par satellite les déplacements des manchots royaux lors de leurs voyages alimentaires en mer, grâce à des balises Argos collées sur leur dos. Durant l'été austral, pendant les périodes d'incubation et au début de l'élevage du poussin, la plupart des manchots adultes rejoignent le front polaire pour y trouver une nourriture abondante : cette zone océanique à la limite d'influence des eaux antarctiques, située à 400 ou 500 kilomètres au Sud des colonies de l'archipel Crozet, contient des concentrations élevées en mésoplancton et en poissons myctophidés. Toutefois, d'une année sur l'autre, le front polaire se déplace parfois de plusieurs centaines de kilomètres vers le Sud, faisant varier la durée des séjours en mer des manchots qui s'y rendent. En fonction de cette durée, le parent à terre lors de l'éclosion de l'œuf sera soit le père, soit la mère.

Comment le parent présent conserve-t-il des réserves pour nourrir le poussin au cas où le partenaire ne rentrerait pas à temps ? Pour répondre à cette question, nous avons déterminé le contenu stomacal des manchots royaux à leur retour de mer et à leur départ de la colonie durant toute la période d'incubation, dans une colonie de l'île de la Possession, dans

l'archipel Crozet (voir la figure 4). Lors des premiers jeûnes d'incubation, où l'adulte n'a aucune chance d'assister à l'éclosion, son estomac est vide, hormis quelques cailloux et becs de calmars. En revanche, lorsque l'œuf risque d'éclore ou qu'il vient d'éclore, l'adulte a l'estomac plein de nourriture qu'il a ramenée de son voyage en mer. C'est le cas des mâles qui reviennent à terre trois semaines environ avant l'éclosion. Les femelles, elles, ne reviennent généralement que quelques jours avant l'éclosion (voir le cas A de la figure 4). L'éclosion pouvant avoir lieu avant la fin de leur tour d'incubation, les mâles conservent de la nourriture dans leur estomac sans la digérer tout en jeûnant. Ainsi, ils peuvent nourrir le poussin au cas où la femelle ne reviendrait pas de son séjour alimentaire en mer avant l'éclosion (en général, elle revient avant, de sorte que peu de mâles utilisent la nourriture stockée). Le bol alimentaire, composé de poisson sous la forme d'une pâte et d'organes entiers de calmars, se conserve pendant plusieurs semaines dans l'estomac des mâles : la digestion est ralentie, mais ne s'arrête pas complètement, comme en témoignent les transformations biochimiques du bol alimentaire, telle la diminution de la concentration totale en lipides. Ce bol alimentaire ne subit pas de fermentation bactérienne.

Les mâles qui arrivent entre trois semaine et dix jours avant l'éclosion stockent environ 200 grammes de nourriture, bien que leur estomac puisse en contenir plusieurs kilogrammes. C'est probablement après s'être alimenté pour se reconstituer trois à quatre kilogrammes de graisse, qu'ils ingurgitent ces 200 grammes sans les digérer. Cette quantité suffit à assurer la survie du poussin pendant dix jours. Lorsque le mâle revient à la colonie quelques jours avant l'éclosion (voir le cas c de la figure 4), il stocke environ 600 grammes, car il devra nourrir le poussin une à plusieurs semaines après l'éclosion. La quantité de nourriture qu'il rapporte est ajustée en fonction du délai qui reste avant l'éclosion et des besoins alimentaires du poussin après l'éclosion. Cette observation suggère l'existence d'une horloge interne chez l'adulte.

L'estomac du manchot royal assure deux fonctions distinctes : une fonction de digestion lors de l'assimilation de la nourriture en mer et une fonction de stockage lors de l'incubation à terre, ce qui suppose une grande flexibilité

les mécanismes digestifs. Aujourd'hui, avec nos collègues strasbourgeois, nous essayons d'élucider les mécanismes physiologiques et biochimiques impliqués dans l'arrêt de la digestion et la conservation de la nourriture sans fermentation dans l'estomac du manchot royal (dont la température interne est de l'ordre de 38 °C).

Le stockage implique une fermeture du pylore (qui fait communiquer l'estomac avec le duodénum), laquelle évite l'évacuation du bol alimentaire vers les intestins. On sait que le manchot du Cap (*Spheniscus demersus*) retarde cette évacuation, mais de 24 heures seulement.

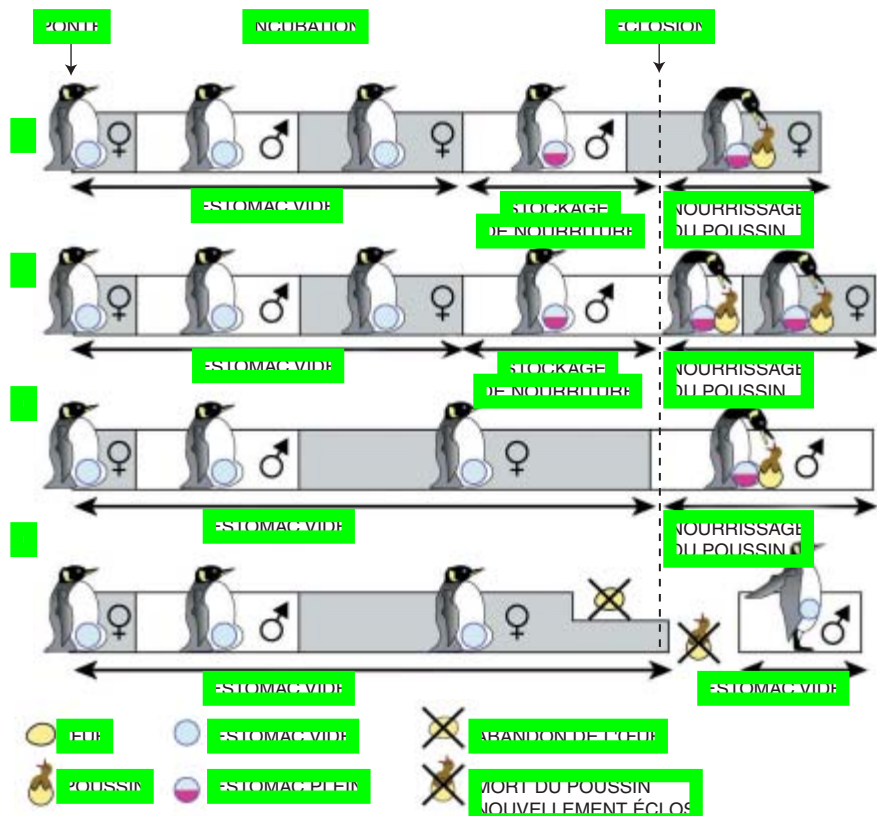
Chez le manchot royal, la diminution de la concentration totale en lipides pourrait provenir d'une « fuite » par le pylore ou de leur dégradation par des bactéries. En cas de démixtion des phases aqueuses et lipidiques, la hauteur du pylore par rapport à l'estomac favoriserait la fuite des huiles surnageant au dessus de la phase aqueuse.

Chez une espèce de grenouille australienne récemment disparue (*Rheobatrachus silus*), la digestion s'arrêtait aussi de façon prolongée pendant la reproduction. Les œufs et les têtards se développaient dans l'estomac de la femelle en produisant des hormones inhibitrices des sécrétions acides de la muqueuse gastrique. Une inhibition hormonale comparable existe-t-elle chez le manchot royal? La muqueuse gastrique produit-elle des peptides, qui, comme ceux que fabrique la peau des grenouilles ou la muqueuse intestinale des mammifères, inhibent certaines sécrétions, bloquent l'activité d'enzymes ou jouent un rôle antimicrobien?

Une stratégie originale

Lors de l'élevage du poussin chez le manchot de Magellan (*Spheniscus magellanicus*), l'acidité du contenu stomacal diminue pendant les douze heures qui précèdent le retour à la colonie. Une telle variation chez le manchot royal ralentirait l'activité des enzymes gastriques ce qui aurait pour effet de préserver le bol alimentaire dans un état non digéré jusqu'à l'éclosion du poussin.

La stratégie de stockage de nourriture dans l'estomac du manchot royal diffère des stratégies connues chez d'autres espèces : beaucoup réduisent la durée des voyages en mer à la fin de la période d'incubation, ce qui augmente les chances que le poussin soit rapidement nourri. Le manchot Adé-



1. LE CONTENU DE L'ESTOMAC DES MANCHOTS royaux en période d'incubation, à leur retour de la mer et à leur départ, a été étudié par les auteurs et révèle que le stockage de nourriture dépend du délai restant avant l'éclosion. Les parents se relaient pour couvrir : pendant que l'un est à terre, l'autre part pour un voyage en mer dont la durée varie, de sorte que plusieurs cas se présentent. La femelle revient en général quelques jours avant l'éclosion (A) : c'est elle qui nourrit le poussin, et la nourriture stockée par le mâle n'est pas nécessaire. Quand l'éclosion a lieu avant le retour de la femelle (B), le poussin est nourri par le mâle, qui régurgite le contenu de son estomac : dès son retour, la mère nourrit le poussin, et le père retourne pêcher pour s'alimenter. Quand le mâle arrive juste avant ou juste après l'éclosion (C), il rapporte trois fois plus de nourriture que n'en contenait son estomac dans les cas envisagés en A et B. Quand le mâle ne revient pas à temps (D), la femelle abandonne son œuf si elle n'a plus de réserves corporelles (dans le cas représenté en D, elle en a moins qu'en C) ou attend l'éclosion, mais, son estomac étant vide, le poussin meurt de faim. Si le mâle revient bien après l'éclosion, son estomac est vide : son horloge interne semble lui indiquer qu'il n'aura plus de poussin à nourrir.

lie (*Pygoscelis Adeliae*) réduit la durée de son dernier voyage alimentaire en mer pour que son retour coïncide avec la date d'éclosion. Chez le manchot empereur, l'espèce la plus proche phylogénétiquement du manchot royal, les femelles reviennent de mer en moyenne dix jours après l'éclosion, alors que le mâle jeûne depuis plus de trois mois. Conserver de la nourriture dans l'estomac pendant si longtemps étant probablement impossible, le mâle produit un liquide d'aspect laiteux et très riche en énergie dont il nourrit le poussin en attendant le retour de la femelle grâce à des cellules sécrétrices situées dans l'œsophage. Chez les pétrels et les albatros, les adultes nourrissent leur poussin à l'aide d'huiles composées principalement de triglycérides et de vitamines. Ces huiles ont une valeur énergétique très élevée et proviennent d'une digestion sélective des proies. L'eau et les protéines sont évacuées dans les intestins, tandis que les lipides sont

accumulés dans l'estomac sous forme d'huiles. Le stockage par le manchot royal mâle d'une quantité de nourriture ajustée aux besoins du poussin et préservée pendant plusieurs semaines constitue un remarquable exemple d'optimisation du succès reproducteur d'un animal en fonction de ses contraintes environnementales.

Michel GAUTHIER-CLERC, Yvon LE MAHO, Yves HANDRICH sont éco-physiologistes au Centre d'écologie et de physiologie énergétiques du CNRS à Strasbourg.

M. GAUTHIER-CLERC, Y. LE MAHO, Y. CLERQUIN, S. DRAULT et Y. HANDRICH, *Penguin fathers preserve food for their chicks*, in *Nature*, 21 décembre 2000.

C.-A. BOST et al., *Foraging Habitat and Food intake of Satellite-Tracked King Penguins during the Austral summer at Crozet Archipelago*, in *Marine Ecology Progress Series*, vol. 150, pp. 21-33, 1997.

À la recherche d'autres terres

AURANCE DOYLE • HANS-JORG DEEG • TIMOTHY BROWN

Les astronomes ont découvert des dizaines de planètes en dehors de notre Système solaire, mais ils n'ont pas réussi à capturer de sœur jumelle de la Terre... pour l'instant.

Personne n'a jamais vu de planète en dehors de notre Système solaire. Toutefois, au mois de novembre 1999, deux astronomes ont observé, à distance, une planète, ce qui s'en approche le plus : sa silhouette. L'astronome Greg Henry, de l'Université du Tennessee, et David Charbonneau, de l'Université de Harvard, ont étudié, chacun de leur côté, la luminosité de l'étoile HD 209458. Cette étoile est si quelconque que personne n'a jugé utile de lui donner un véritable nom. Toutefois, elle deviendra peut-être célèbre, car une planète, dont la masse est égale aux deux tiers de celle de Jupiter, gravite autour d'elle. C'est

du moins ce que pensent les astronomes, car sa présence demeure hypothétique. Elle a été déduite des faibles modifications périodiques de l'orbite stellaire qu'ils ont observées et qui indiqueraient que l'étoile subit une force gravitationnelle due à un compagnon invisible. D. Charbonneau et G. Henry ont cherché à confirmer son existence par une autre méthode, dite des transits. La planète pourrait-elle, se sont-ils demandé, passer devant l'étoile et masquer momentanément la lumière émise ? Si tel était le cas, la luminosité de l'étoile diminuerait. Un tel événement, connu sous le nom d'occultation ou transit, s'observe seulement

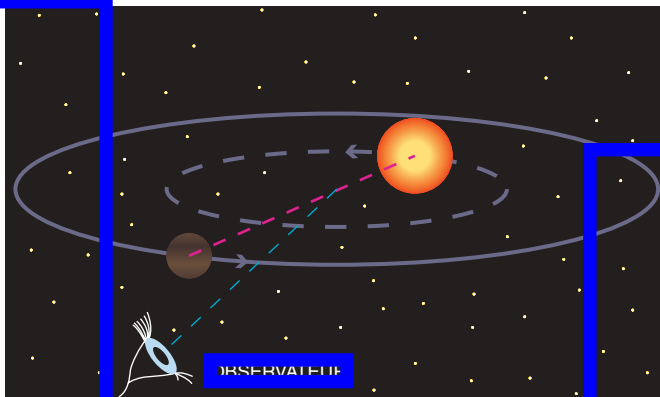
UNE PLANÈTE COMPARABLE À LA TERRE aurait été détectée autour de l'étoile binaire 51 Draconis. Les auteurs ont observé une légère atténuation de la luminosité des étoiles qui se produit périodiquement et qui révélerait peut-être le passage d'une planète entre l'étoile et les observateurs. L'observation de ces variations s'avère aujourd'hui le meilleur moyen de découvrir des mondes habitables.



si l'orbite planétaire est inclinée de sorte qu'on l'observe presque sur la tranche. Pour des planètes en orbite rapprochée autour de leur étoile, on peut calculer la probabilité d'un tel alignement. Elle est égale au rapport du rayon de l'étoile sur la distance entre l'étoile et sa planète. Dans le cas de HD 209458, elle atteint un sur dix. Pourtant, les recherches de passage d'autres planètes devant leur étoile se sont soldées par des échecs. Quelques astronomes remettaient en

cause l'existence même de ces planètes extrasolaires, ou exoplanètes. Les observations des mouvements stellaires avaient-elles été mal interprétées? D. Charbonneau et G. Henry ont dissipé ces doutes. Ils ont guetté les mouvements de l'étoile qui indiquent un transit. Quand l'étoile se situe le plus loin de l'observateur, la planète est en effet proche du point d'occultation (voir la figure 2). Au moment qu'ils avaient prévu, la luminosité de HD 209458 a diminué d'environ 1,8 pour cent, pendant trois heures. Cette atténuation de luminosité a clairement prouvé l'existence d'une planète, et les astronomes ont même évalué, pour la première fois, la taille d'une exoplanète (voir la figure 3). Son diamètre est de l'ordre de 1,3 fois celui de Jupiter, en accord avec la théorie qui prévoit que, proche de son étoile, une planète gonfle comme du pop-corn. La méthode des transits remportait ainsi son premier succès.

Jusqu'à présent, les chasseurs de planètes se fiaient surtout à la technique des mouvements stellaires, ou méthode des vitesses radiales. Son principe est simple. L'orbite d'une étoile est déviée si une planète gravite autour d'elle. Quand l'étoile se rapproche de nous, ses raies de son spectre se décalent vers des longueurs d'onde plus courtes, donc vers le bleu. Quand elle s'éloigne, les raies se décalent vers le rouge. En mesurant ces décalages Doppler périodiques, les astronomes peuvent estimer l'orbite et la masse de la planète ou des planètes en orbite. La présence de Jupiter, par exemple, entraîne une variation de la vitesse du Soleil de 12,5 mètres par seconde sur douze ans. Les raies spectrales du Soleil ne se décalent alors que de 0,00002 nanomètre dans la portion visible du spectre



2. QUAND LA PLANÈTE SE SITUE SUR L'AXE qui passe par l'observateur et l'étoile, alors elle éclipse une partie de la lumière de l'étoile. Cela se produit quand l'étoile atteint la position la plus lointaine par rapport à l'observateur, ce qu'indique la méthode des vitesses radiales.

autour de 500 nanomètres). Pour la Terre, la vitesse change seulement d'un dixième de mètre par seconde sur la même période. Cette méthode a permis la découverte, en 1995, d'une planète en orbite autour de l'étoile de type solaire 51 Pegasi (l'étoile 51 de la constellation Pégase). Depuis, les astronomes ont repéré 50 planètes extrasolaires (voir l'encadré de la page 83). La méthode des vitesses radiales peut être appliquée à n'importe quelle étoile, mais ne détecte pas les planètes trop petites ou trop éloignées de leur étoile. La méthode des transits permet aujourd'hui de repérer des exoplanètes aussi petites que la Terre, mais elle nécessite des alignements fortuits. Nous nous sommes fondés sur cette méthode pour nous lancer, à notre tour, à la recherche de planètes de type terrestre. Certaines sont-elles des havres de vie?

Une petite tache noire sur le Soleil

L'idée de rechercher des occultations n'est pas nouvelle. Après tout, une éclipse solaire n'est rien d'autre que le passage de la Lune devant le Soleil. Johannes Kepler avait déjà prédit les passages de Mercure devant le Soleil au début du XVII^e siècle, et le capitaine Cook avait entrepris son premier voyage vers les mers du Sud pour observer, notamment, le transit de Vénus en 1769. Les astronomes de l'époque utilisaient ces événements pour trianguler la distance entre la Terre et le Soleil. L'idée d'observer des occultations devant des étoiles autres que le Soleil a été émise pour la première fois en 1951, dans une note d'Otto Struve, de l'Observatoire Yerkes de l'Université de Chicago. Frank Rosenblatt, de l'Université Cor

nell, a repris l'idée en 1971. Puis William Borucki, au début des années 1980, du Centre de recherche Ames de la NASA, en Californie.

Lors d'une occultation de Mercure ou de Vénus, les astronomes aperçoivent un petit point noir passer devant le Soleil. Les passages de planètes extrasolaires sont détectés, non pas aussi directement mais en suivant l'évolution de la luminosité de l'étoile en fonction du temps. Une diminution périodique correspond au passage régulier d'une planète. La mesure de

la luminosité stellaire représente une branche de l'astronomie, nommée photométrie. L'œil humain peut détecter sans l'aide d'aucun appareil, des variations d'un facteur 2,5 de la luminosité d'une étoile. En comparant la luminosité de deux étoiles, un œil exercé peut distinguer des variations encore plus faibles. De petits télescopes équipés de caméras numériques très sensibles enregistrent ces variations avec une précision de 0,1 pour cent. En recueillant plus de lumière et en corrigeant les irrégularités atmosphériques, les plus grands télescopes atteignent une précision trois fois supérieure.

Les mesures photométriques de transit sont plus sensibles que les autres méthodes de détection pour les petites planètes : la quantité de lumière stellaire occultée par la planète est proportionnelle au rapport de la surface de la planète sur celle de l'étoile. Ainsi, elle varie comme le carré du rayon de la planète sur le carré du rayon de l'étoile. Par comparaison, la variation de la vitesse radiale d'une étoile est proportionnelle au rapport entre les masses de la planète et de l'étoile, c'est-à-dire proportionnelle au rapport des cubes de leur rayon. Les planètes étant beaucoup plus petites que les étoiles, le rayon de Jupiter mesure environ un dixième de celui du Soleil, et celui de la Terre un centième), le rapport des carrés est supérieur à celui des cubes, ce qui explique l'intérêt des mesures de transit. Par exemple, par la méthode des transits de HD 209458, environ 40 000 photons ont été enregistrés en fonction du temps au moyen d'un photomètre, tandis qu'une mesure équivalente avec la méthode des vitesses radiales avait requis plus de dix millions de photons, subdivisés en bandes

de longueur d'onde par un spectromètre. Ainsi, pour une même taille de planète, la méthode des vitesses radiales exige des télescopes plus gros que la méthode photométrique. Un télescope de un mètre suffit pour détecter une planète de la taille de Jupiter qui entraîne une baisse de luminosité de son étoile de l'ordre de un pour cent. En revanche, une planète de la taille de la Terre entraîne une diminution de l'ordre de 0,01 pour cent, qu'aucun des plus grands des télescopes actuels ne peut détecter, sauf si on utilise des astuces d'observation pour la détection du signal.

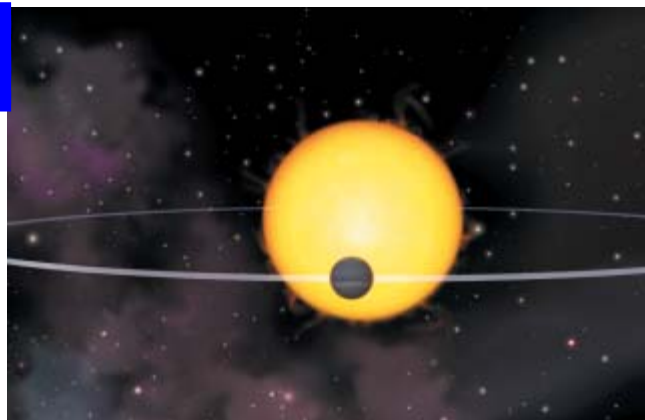
La méthode des transits présente un autre avantage : dès que l'observateur, la planète et l'étoile sont alignés, les transits sont détectés aussi facilement pour des planètes éloignées que pour des planètes proches de l'étoile. Comparée aux années-lumière qui séparent l'étoile de la Terre, la

distance entre la planète et l'étoile est insignifiante ; elle pourrait varier de façon importante sans que notre perception de l'atténuation change. En revanche, la sensibilité de la méthode des vitesses radiales diminue avec la racine carrée de la distance entre la planète et l'étoile, car les planètes lointaines exercent une attraction gravitationnelle plus faible sur leur étoile. Cela explique pourquoi la plupart des planètes découvertes par cette méthode sont en orbite rapprochée et sont, le plus souvent, des corps massifs, de la taille de Jupiter.

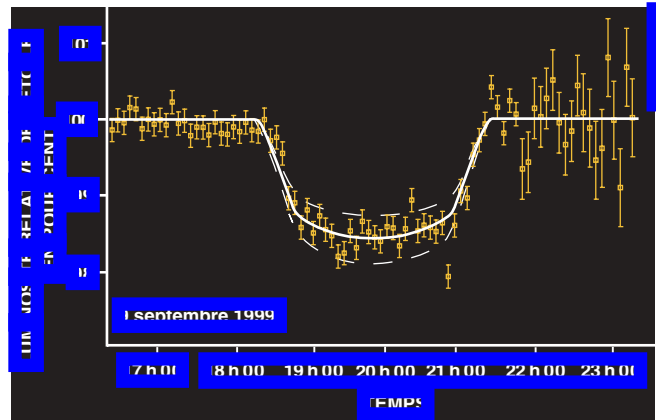
Quelles autres planètes autour des autres soleils ?

L'augmentation de la distance entre la planète et son étoile réduit la probabilité d'alignement, puisque cette dernière est égale au rapport du rayon de l'étoile sur la distance entre l'étoile et

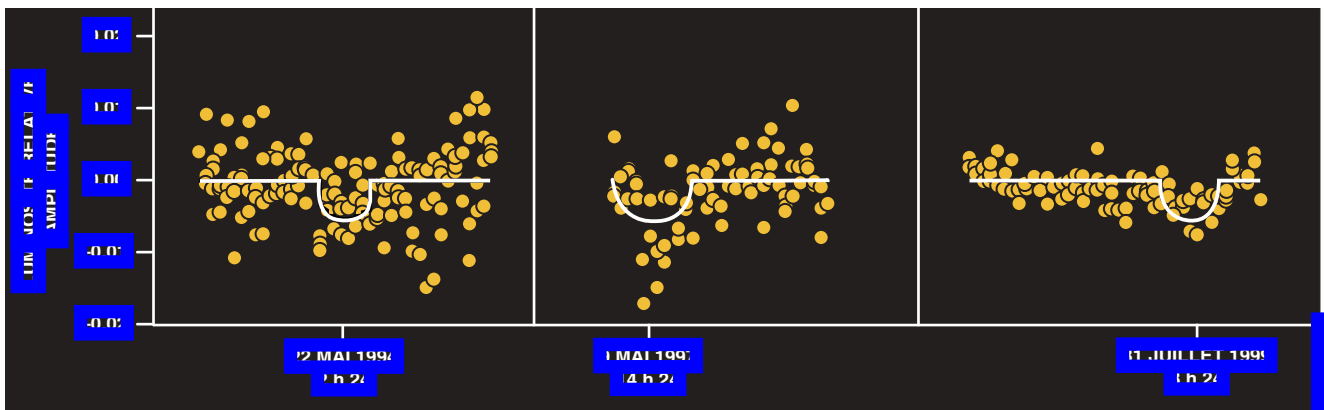
la planète. Par exemple, la probabilité qu'un astronome extraterrestre soit correctement situé pour observer le passage de la Terre sur son orbite actuelle devant le Soleil ne dépasse pas 0,5 pour cent. C'est pourquoi la méthode des transits a été longtemps négligée. Elle a connu un regain d'intérêt après la découverte de planètes géantes extrasolaires très proches de leur étoile mère. Les orbites rapprochées augmentent la probabilité d'alignement d'un facteur dix. Cette découverte était inattendue, car les planètes géantes de notre système solaire sont localisées sur des orbites lointaines. De surcroît, l'introduction de systèmes d'imagerie à grand champ, capables de suivre des centaines de milliers d'étoiles à la fois, a aussi ravivé l'intérêt pour la méthode des transits. Plus les étoiles surveillées sont nombreuses, plus les chances d'observer des occultations augmentent. Les astronomes établissent ainsi la liste des



3. LE PREMIER SUCCES de la méthode des transits a été la confirmation de la présence d'une planète autour de l'étoile de type solaire HD 209458 (à gauche). La diminution de 1,8 pour cent de la luminosité de l'étoile (les points du schéma à droite avec des barres d'erreurs) apparaît sans ambiguïté. Elle indique la présence d'une planète dont le diamètre vaut 1,3 fois celui de Jupiter



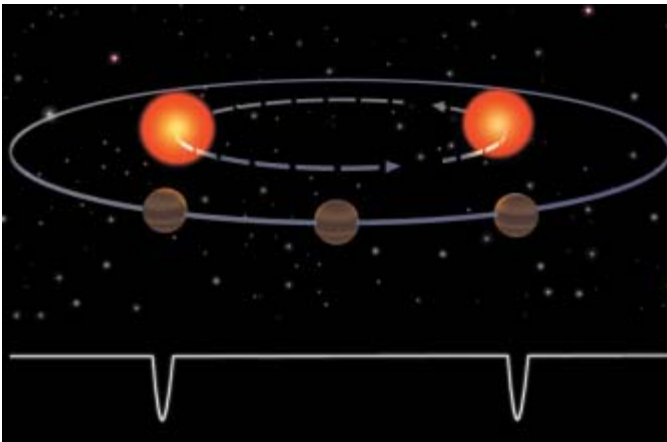
er (courbe blanche, tracé en plein), bien qu'une planète dix pour cent plus grosse ou plus petite puisse avoir le même effet (courbes blanches tracées en pointillé). D'après des observations récentes le diamètre serait plutôt égal à 1,6 fois celui de Jupiter. Les barres d'erreurs augmentent après l'occultation, car l'étoile était alors proche de l'horizon.



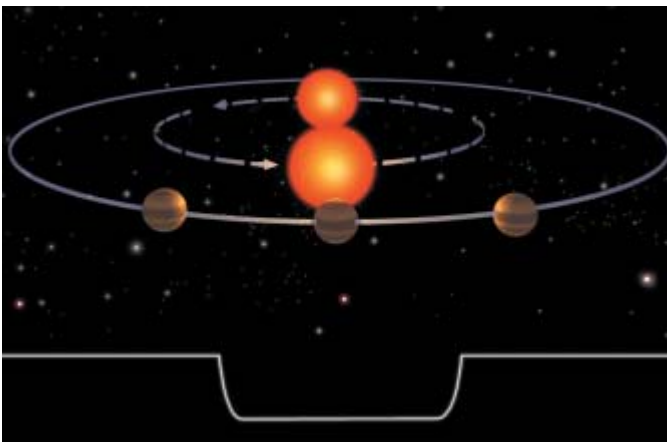
4. LE BRUIT DE FOND risque de masquer des signaux qui indiquent une planète dissimulée dans ces mesures de luminosité de l'étoile binaire CM Draconis (points). Pour distinguer le scintillement des instabilités atmosphériques d'une atténuation causée

par une planète, les auteurs recherchent des variations régulières du signal. Les courbes correspondent à l'atténuation théorique pour un corps gros comme deux fois et demie la Terre sur une orbite de 23 jours.

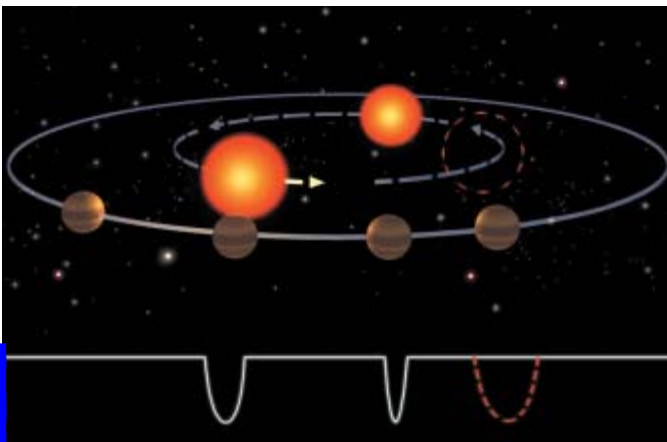
5. METHODE DE DETECTION des planètes par occultation. Considérons une planète dans un système stellaire binaire. Les astronomes ne voient pas les deux étoiles isolées : les lumières qu'elles émettent se confondent. Quand la planète passe devant chacune des deux étoiles par rapport à nous, le système s'obscurcit de façon caractéristique. L'ampleur et la durée de l'obscurcissement dépendent de la position des étoiles sur leur orbite.



ici, la séparation apparente des étoiles est maximale. La planète effectue un double transit : elle passe devant l'une, puis devant l'autre étoile.



Quand la planète passe devant l'une des étoiles, tandis qu'elle-même éclipse la seconde, le transit peut durer plus longtemps et produire une diminution relative de la luminosité supérieure.



Quand la planète passe devant les étoiles juste avant une éclipse stellaire, on observe alors un triple transit : tout d'abord devant l'étoile la plus proche, puis devant la plus éloignée (mais pendant un temps plus court, parce que la planète et l'étoile éloignée se déplacent en sens contraire), et enfin à nouveau devant l'étoile proche.

planètes découvertes et évaluent, d'après leur probabilité d'alignement, le nombre total de planètes existantes.

La plupart des programmes en cours recherchent, à partir de télescopes terrestres, des planètes géantes comme celle découverte en orbite proche autour de HD 209458. Le projet *Stare* (*Stellar astrophysics and research on exoplanets*), c'est-à-dire astrophysique stellaire et recherche d'exoplanètes), dirigé par T. Brown, et le projet *Vulcan*, dirigé par W. Borucki, D. Koch, du Centre Ames de la NASA, et J. Jenkins, de l'Institut Seti (pour la recherche d'une intelligence extrasolaire), en Californie, visent la Voie lactée, où les étoiles sont très abondantes.

Des recherches ont également été menées grâce au télescope spatial *Hubble*. Les astronomes ont observé 34 000 étoiles dans l'amas globulaire 47 Tucanae pendant huit jours. D'après leurs calculs, ils s'attendaient statistiquement à observer 30 transits. Or, ils n'en ont pas détecté un seul et s'interrogent encore sur ce résultat. Il est possible que l'amas ne contienne aucune planète, soit parce que ses étoiles sont pauvres en éléments lourds, constituants des planètes, soit parce que les étoiles, trop proches, ont perturbé l'orbite des planètes depuis la formation de l'amas, il y a quelque dix milliards d'années.

Les astronomes visent surtout des étoiles massives et les observent sur de courtes durées : ils recherchent des planètes de type géantes gazeuses, qui ne peuvent abriter la vie telle que nous la connaissons.

Afin de rechercher des mondes habitables, c'est-à-dire susceptibles de contenir de l'eau liquide, nous avons choisi une approche différente, suggérée par Jean Schneider et ses collaborateurs. Nous recherchons des étoiles relativement petites. Pourquoi ? Parce que les planètes trop proches de leur étoile subissent un terrible effet de serre. La stratosphère de ces planètes est saturée en vapeur d'eau : la lumière solaire casse l'eau en oxygène et en hydrogène, et l'hydrogène s'échappe dans l'espace. La planète finit par se dessécher et par devenir extrêmement chaude comme Vénus. De même, les planètes très éloignées de leur étoile subissent un refroidissement aussi catastrophique. Les gaz à effet de serre, tel le dioxyde de carbone, se transforment en neige, qui réfléchit plus de rayonnement que les roches, ce qui accélère le refroidissement. La planète gèle, comme Mars. Les étoiles plus petites que le Soleil sont les plus froides, et les zones habitables sont donc plus proches de l'étoile, ce qui accroît la probabilité d'observer des transits. En outre, une planète donne un signal d'occultation plus net quand elle passe devant une petite étoile. Par conséquent, s'il existe des planètes abritant la vie, nous avons plus de chances de les détecter.

L'ombre des autres terres

Parmi les petites étoiles, nous avons choisi celles qui présentent les alignements indispensables aux occultations. Nous les surveillons longtemps (trois mois), afin que les signaux de transits périodiques s'accumulent et finissent par apparaître, même s'ils sont trop faibles pour être détectés un à un. Nous avons sélectionné des systèmes binaires à éclipse, c'est-à-dire des étoiles doubles dont le plan orbital est parallèle à notre ligne de visée. Elles passent régulièrement l'une devant l'autre, leur

uminosité croît et décroît de façon systématique, caractéristique que les astronomes ont recensé des milliers. À part leur orientation particulière, rien ne les distingue des autres étoiles binaires qui constituent les deux tiers des étoiles dans l'Univers. D'après les théoriciens, quand une planète se forme dans un système binaire, elle

apparaît dans le même plan orbital que les deux étoiles. On a alors toutes les chances d'observer des occultations. La planète tourne comme n'importe quelle autre planète, mais elle tourne autour des deux soleils au lieu d'un dans notre Système solaire. Par ailleurs, d'après des calculs de gravitation, son orbite n'est stable que si sa distance au centre de gravité

des deux étoiles est quatre fois supérieure à la distance entre les deux étoiles. Quand une planète passe devant ses étoiles mères, elle bloque la lumière d'une étoile, puis de l'autre, ce qui engendre une double baisse de luminosité caractéristique, dont la forme dépend de la configuration géométrique des trois (voir la figure 5)

Où en sommes-nous ?

Aujourd'hui, on a dénombré 50 planètes qui gravitent autour d'étoiles semblables au Soleil. Les télescopes du monde entier (Hawaii, Californie, Massachusetts, Chili, Australie, France) en recensent de nouvelles, pour la plupart massives et proches de leur étoile, presque tous les mois. Ces découvertes remettent en cause les théories sur la genèse et sur la diversité des systèmes planétaires.

Ces 50 planètes ont toutes été découvertes en mesurant les mouvements des étoiles, causés par l'attraction des planètes (méthode des vitesses radiales). La toute première planète découverte par M. Mayor et D. Queloz, de l'Observatoire de Genève, en 1995, fut une planète d'une masse équivalente à celle de Jupiter en orbite très rapprochée (0,05 unité astronomique) autour de l'étoile 51 Pegasi (une unité astronomique correspond à la distance Terre-Soleil). Personne ne s'attendait à une orbite aussi serrée. Peu après, une équipe dirigée par G. Marcy et R. Butler, alors à l'Université de San Francisco, a annoncé la découverte de planètes massives en orbite encore plus proche autour de deux autres étoiles. L'orbite de celle qui gravite autour de 70 Virginis est très aplatie, à la différence de celles des planètes du Système solaire.

En étudiant 800 étoiles à proximité du Soleil, les astronomes ont montré qu'une planète géante gravite autour d'une étoile sur 20 environ. Certaines, comme celles de 51 Pegasi, sont des planètes rapprochées en orbite circulaire. D'autres, comme celles de 70 Virginis, ont des orbites plus larges et étirées. Upsilon, de la constellation d'Andromède, renferme plusieurs planètes. D'autres étoiles, parmi lesquelles 55 Cancri, auraient aussi toute une famille de planètes.

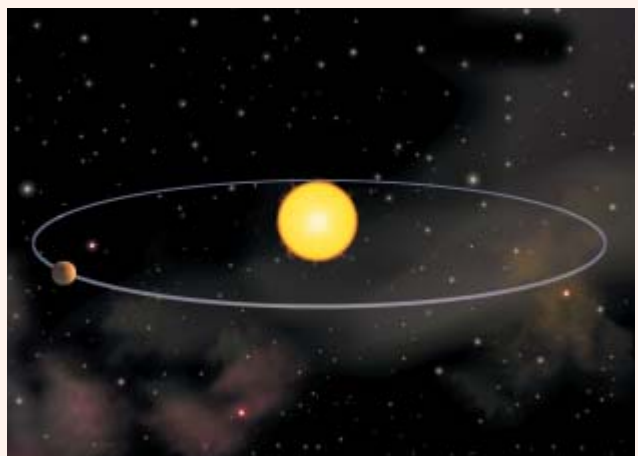
Grâce à l'amélioration de la précision des mesures de vitesses radiales, on a découvert deux autres planètes, d'une masse proche de celle de Saturne, soit environ le tiers de la masse de Jupiter. Cette découverte a été suivie de celle d'une troisième planète de la masse de Saturne par l'équipe suisse. Tout cela confirme les prédictions de l'existence de nombreuses planètes de petite masse. À l'inverse, les naines brunes en orbite serrée (des étoiles « ratées » dont la masse est comprise entre 10 et 80 fois celle de Jupiter) semblent beaucoup plus rares qu'on ne l'avait pensé. Les planètes et des naines brunes ne sont peut-être pas issues des mêmes mécanismes.

Les orbites étirées restent assez mystérieuses aussi. Les planètes se forment dans les disques de gaz et de poussière qui entourent les jeunes étoiles, et la friction devrait rendre leur orbite circulaire. Comment 70 Virginis et ses analogues ont-elles pu échapper à la règle ? Les comètes, dans le Système solaire, fournissent peut-être une indication. Leurs orbites deviendraient elliptiques, suite à des rencontres rapprochées avec les planètes. Peut-être les planètes se livrent-elles à des jeux de lance-pierres identiques ? Si tel est le cas, notre Système solaire, avec ses orbites planétaires pour la plupart circulaires, relève peut-être plus de

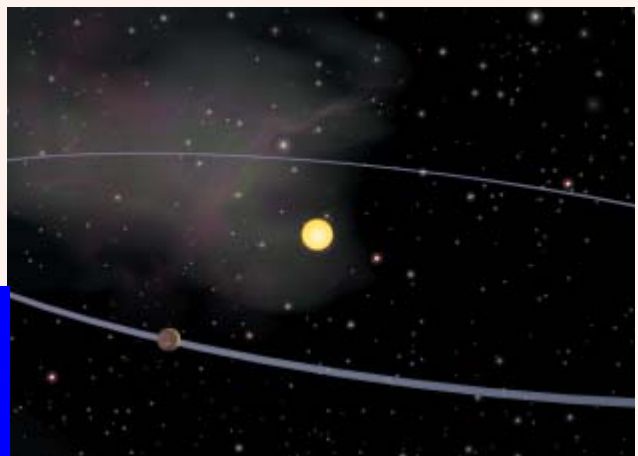
l'exception que de la règle. Dans d'autres cas, par exemple pour 6 Cygni B, l'influence gravitationnelle d'une étoile compagne serait responsable de la distorsion des orbites.

Par ailleurs, les étoiles qui abritent des exoplanètes ont tendance à avoir des concentrations très élevées en éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium. Existe-t-il un seuil critique de concentration en éléments lourds dans les étoiles et leur environnement, au-dessous duquel les planètes ne se forment jamais ? Une explication possible est que les étoiles se seraient enrichies en éléments lourds en absorbant les planètes toutes jeunes.

Ray JAYAWARDHANA étudie l'origine des planètes à l'Université de Berkeley.



La planète qui gravite autour de 51 Pegasi illustre l'un des deux types d'orbites planétaires observés : serrée et circulaire.



La planète autour de 70 Virginis illustre l'autre type d'orbites planétaires : plus large et elliptique.

Trois missions spatiales

L'idée de consacrer une mission spatiale à la recherche de planètes analogues à la Terre par la méthode des transits date du milieu des années 1980. Celle de mettre à profit les projets de sismologie stellaire du CNES a germé en 1988. Elle s'est concrétisée par le projet *COROT* (COnvection, ROTation et Transits planétaires), initialement consacré à la seule sismologie stellaire et approuvé par le CNES en octobre 2000. D'autres pays européens (Autriche, Belgique, Espagne et sans doute bientôt l'Italie) et l'Agence spatiale européenne s'y sont joints.

COROT se présente sous la forme d'un petit télescope de 27 centimètres de diamètre, lancé en 2004 sur une orbite « polaire » (perpendiculaire à l'équateur terrestre) à une altitude de 800 kilomètres. La sonde enregistrera, au moyen de caméras numériques très sensibles, leur luminosité toutes les 32 secondes avec une précision atteignant un pour 10 000 au bout d'une heure d'accumulation des enregistrements. Le télescope sera pointé vers 12 000 étoiles à 30 degrés de la Voie lactée, dans une direction opposée au Soleil. Six mois plus tard, changement de cap : la Terre aura tourné autour du Soleil, *COROT* changera alors son orientation de 180 degrés afin d'éviter la lumière du Soleil, et visera un second champ d'étoiles, avant de revenir au voisinage du premier six mois plus tard, et ainsi cinq fois de suite. Au total, ce seront 60 000 étoiles qui seront suivies pendant deux ans et demi. On devrait détecter 400 planètes géantes, mais surtout des planètes telluriques, sans compter les éventuels satellites et anneaux de planètes. Si tout va bien, *COROT* sera le premier à détecter, à partir de 2005, une autre Terre dans l'Univers.

Deux autres missions sont en cours d'élaboration. La première est celle de l'Observatoire Eddington, projet de l'Agence spatiale européenne. La seconde est le projet Kepler, soumis à la NASA, qui n'a pas encore été adopté non plus. Les deux surveilleront plus de 100 000 étoiles pendant trois à cinq ans et devraient ramener, d'ici 2010, une moisson de plus de 100 terres chacune.

Jean SCHNEIDER, Observatoire de Paris

Ainsi, les binaires à éclipses représentent une aubaine pour les chasseurs de planètes, ainsi que Jean Schneider et Michel Chevreton, de l'Observatoire de Meudon, ont été les premiers à le faire remarquer.

En 1994, nous avons organisé avec eux un réseau mondial de télescopes afin de rechercher des planètes de type terrestre autour de CM Draconis, l'un des plus petits systèmes binaires à éclipses connus. Il est constitué de deux étoiles quatre fois plus petites que le Soleil, très froides, âgées d'environ neuf milliards d'années et situées à 54 années-lumière. La luminosité de CM Draconis est dix fois plus faible que celle de HD 209458. Les planètes habitables auraient une période orbitale comprise entre 18 et 35 jours. Les six télescopes du réseau ont observé cette zone pendant plus de 1 000 heures. Depuis six ans, des astronomes du monde entier ont réuni leurs mesures, obtenues à diverses longitudes.

La difficulté a consisté à distinguer le signal lié aux occultations dans le

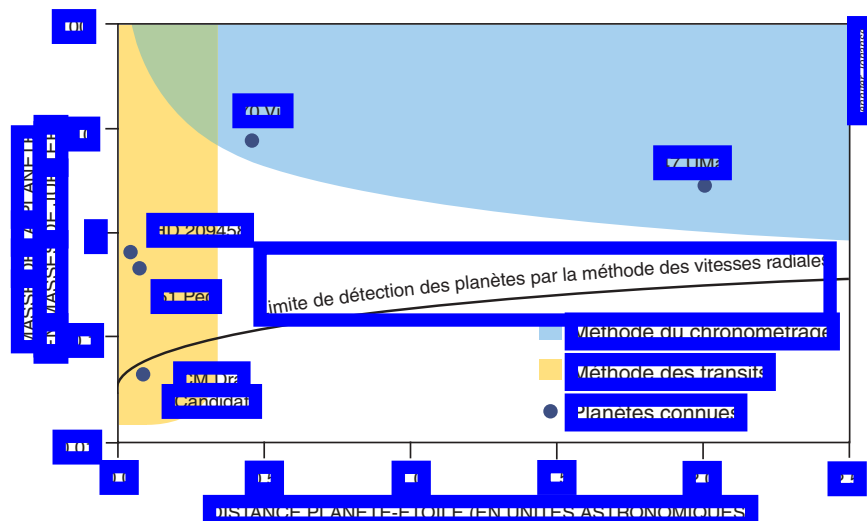
bruit dû aux instabilités de l'atmosphère terrestre, de l'éclat stellaire et du bruit des instruments. Toutefois, les signatures de transits devant les binaires à éclipses sont régulières, caractéristiques et prévisibles, si bien que l'algorithme mis au point avec J. Jenkins nous permet de détecter des planètes, alors même que la baisse de luminosité est noyée dans le bruit de fond. En pratique, nous avons comparé aux enregistrements plus de 400 millions de motifs susceptibles de correspondre à des transits. Grâce à cette technique, nous avons identifié neuf possibilités. Toutes correspondent à une planète dont le rayon serait égal à deux fois et demie celui de la Terre, mais neuf orbites sont possibles (voir la figure 4). Nous cherchons si ces passages ont toujours lieu à une date et à une heure précises. Aujourd'hui, seules deux orbites semblent identifiées, l'une de 21 jours, l'autre de 26 jours. Nous continuons ces recherches et nous suivons en outre plusieurs centaines d'autres systèmes binaires à éclipses.

Un monde réglé comme une horloge

A terme, les transits pourraient même révéler si les planètes ont des satellites. En effet, les satellites font légèrement varier le mouvement orbital de leur planète mère, et modifient l'heure de l'occultation. Par exemple, si des astronomes extraterrestres suivaient le Soleil, ils remarqueraient que les transits ont lieu tous les 365,24 jours, et en déduiraient la présence de la Terre. Au bout de quelques années, ils remarqueraient que les passages peuvent intervenir avec deux minutes d'avance ou de retard, ce qui témoigne de la présence de la Lune. Si ces astronomes extraterrestres avaient des instruments photométriques très puissants, ils pourraient même détecter directement la petite baisse de luminosité supplémentaire due à la Lune.

Une planète se manifeste autrement que par ses occultations. Une binaire à éclipses est une sorte d'horloge, car les éclipses s'y produisent à intervalles réguliers. Si le mécanisme n'est pas parfaitement régulier, c'est qu'un corps massif invisible attire les étoiles. Par exemple, si une planète de la masse de Jupiter éloigne de nous une étoile binaire, les éclipses interviendraient avec quelques secondes de retard, c'est-à-dire le temps supplémentaire que mettrait la lumière des deux étoiles pour nous parvenir. Plus la planète est éloignée ou plus sa masse est élevée, plus le décalage augmente (méthode du chronométrage). Ainsi, on peut détecter une planète géante même si elle ne passe pas devant les deux étoiles. D'après les données disponibles, les astronomes savent où les planètes géantes ont des chances d'être situées dans certains systèmes. Par exemple, CM Draconis ne contient aucun corps dont la masse est supérieure à trois fois celle de Jupiter et dont l'orbite est plus rapprochée que celle de la Terre.

Les mesures photométriques de haute précision accumulées pendant des années pourraient aussi fournir des informations sur la lumière réfléchie par les planètes. Les planètes situées sur une orbite assez proche de leur étoile, estimée à moins de dix fois le rayon stellaire environ, réfléchissent une fraction perceptible de la lumière stellaire. Elle engendrerait une ondulation cyclique de moins d'un dix millièmes de l'éclat de l'étoile, mais distincte des autres variations de la luminosité stellaire. Cette technique permettrait de décou-



5. LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS des trois différentes méthodes de détection de planètes sont récapitulés sur cette figure, qui donne la sensibilité de la méthode en fonction de la masse de la planète (axe vertical) et de sa distance à l'étoile mère (axe horizontal). Même à la limite théorique, la méthode des vitesses radiales (la courbe en noir) ne détecte pas de planètes plus petites que Saturne, à moins qu'elles ne soient très proches de leur étoile. La méthode des transits peut repérer des planètes de la taille de la Terre ; des contraintes pratiques limitent actuellement son application à des planètes assez proches (en jaune), mais les missions spatiales à venir élargiront son domaine. La méthode du chronométrage (en bleu) permet de repérer les planètes lointaines plus facilement que les planètes proches de leur étoile.

voir des planètes dont la période orbitale ne dépasse pas une semaine.

Pour réduire le bruit de fond, l'idéal serait de réaliser des observations au-dessus de l'atmosphère terrestre. Un observatoire orbital autoriserait une précision photométrique de l'ordre de 0,002 pour cent. Trois missions sont en cours d'élaboration (voir l'encadré de la page ci-contre).

Un jour aussi, des interféromètres spatiaux devraient supprimer l'éclat des étoiles et permettre de photographier les planètes telluriques pourtant un mill-

iard de fois moins brillante que l'étoile. Ces clichés faciliteraient la recherche des signatures spectrales de la vie, telles que l'ozone, l'eau et le méthane.

Ces découvertes pionnières sont exaltantes. L'astronome de la Renaissance Christiaan Huygens écrivait : « Quel merveilleux et étonnant Ordre des Choses nous donne à contempler la magnifique immensité de l'Univers ! Tant de Soleils, tant de Terres ! » Huygens avait-il raison ? Y a-t-il d'autres planètes semblables à la nôtre ? Sont-elles habitées ? D'ici 2010 nous devrions le savoir.

Laurance DOYLE travaille à l'Institut Seti de Mountain View, en Californie. Hans-Jörg DEEG travaille à l'Institut d'astrophysique d'Andalousie à Grenade, en Espagne. Timothy Brown travaille au Centre national de recherche atmosphérique à Boulder, dans le Colorado.

Circumstellar Habitable Zones : Proceedings of the First International Conference sous la direction de Laurance R. Doyle, Travis House Publications, 1996.

Gregory W. HENRY, Geoffrey W. MARCY, R. Paul BUTLER et Steven S. VOGT, *A Transiting « 51 Peg-like » Planet*, in *Astrophysical Journal*, vol. 529, n° 1, pp. L41-L44, 20 janvier 2000.

David CHARBONNEAU, Timothy M. BROWN, David W. LATHAM et Michel MAYOR, *Detection of Planetary Transits across a Sun-like Star*, in *Astrophysical Journal*, vol. 529, n° 1, pp. L45-L48, 20 janvier 2000.

Laurance R. DOYLE et al., *Observational Limits on Terrestrial-Sized Inner Planets around the CM Draconis System Using the Photometric Transit Method with a Matched-Filter Algorithm*, in *Astrophysical Journal*, vol. 535, n° 1, pp. 338-349, 20 mai 2000.

J. SCHNEIDER et M. CHEVRETON, *The Photometric Search for Earth-Sized Extrasolar Planets by Occultation in Binary Systems*, in *Astron. and Astrophys.*, n° 232, p. 251, 1990.

J. SCHNEIDER et L.R. DOYLE, *Ground-Based Detection of Terrestrial Extrasolar Planets by Photometry : The Case for CM Draconis*, in *Earth, Moon and Planets*, n° 71, p. 153, 1995.

P. SARTORETTI et J. SCHNEIDER, *On the Detection of Satellites of Extrasolar Planets with the Method of Transits*, in *Astron. and Astrophys.*, n° 134, p. 553, 1999.

Les circuits du sexe

IRWIN GOLDSTEIN

Loin d'être indépendant, le pénis est sous l'influence de multiples centres nerveux qui le freinent.

Le pénis n'obéit pas aux ordres de son maître, qui essaie d'avoir, sur commande, une érection, mais se dresse librement pendant le sommeil de son maître. Il semble avoir son propre cerveau.» Léonard de Vinci a fait à qui l'on doit cette observation, a disséqué des pénis de pendus et a été le premier à découvrir que, durant une érection, le sang afflue dans la verge. En revanche, contrairement à ce qu'il pensait, le pénis n'est pas autonome. Il est sous le contrôle du système nerveux central, c'est-à-dire du cerveau et de la moelle épinière : toute perturbation des voies nerveuses qui les relie cause des troubles de l'érection.

Aujourd'hui, grâce aux progrès de la biologie moléculaire, nous connaissons mieux les mécanismes de l'érection et de la détumescence, c'est-à-dire du retour du pénis à l'état flaccide. Ainsi, nous étudions comment le cerveau et la moelle épinière commandent l'érection et les autres fonctions sexuelles. Ces recherches fourniront de nouveaux traitements pour les millions d'hommes qui souffrent de dysfonctionnement sexuel. Par ailleurs, bien que les recherches chez la femme restent timides, nous commençons à découvrir les ressemblances et les différences entre les fonctions sexuelles des hommes et des

emmes

Une érection est une série d'événements minutieusement orchestrés par le système nerveux central. Même au repos, le pénis est sous l'influence du système nerveux central : lorsqu'un homme n'est pas sexuellement excité, les structures du système nerveux sympathique (l'une des deux branches du système nerveux autonome qui commande les fonctions automatiques, telles que la pression sanguine ou le système cardiaque) limite l'afflux du sang dans le pénis, le maintenant ainsi flaccide.

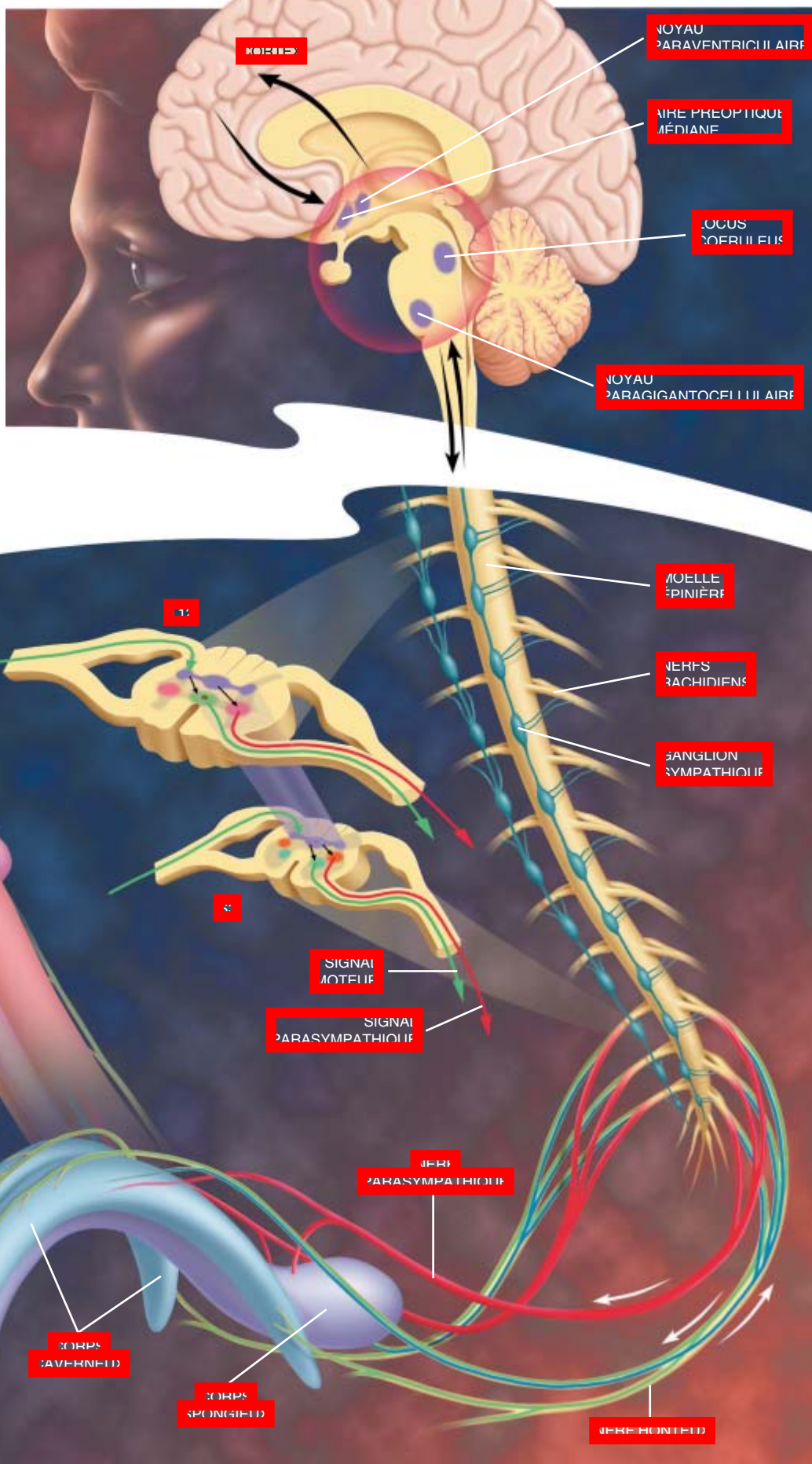
Un équilibre dynamique

Les réactions sexuelles d'un homme reflètent un équilibre dynamique entre les signaux d'excitation et d'inhibition. Tandis que le système nerveux sympathique tend à inhiber les érections, le système parasympathique, l'autre branche du système nerveux autonome, constitue l'une des principales voies excitatrices. Durant l'excitation, des signaux de stimulation naissent dans le cerveau, déclenchés, par exemple, par une odeur, par la vue ou par la pensée d'une partenaire séduisante, ou par une stimulation physique des organes génitaux.

Dans le pénis, les nerfs excitateurs libèrent des neurotransmetteurs dits pro-érectiles, notamment de l'oxyde nitrique et de l'acétylcholine. Ces messagers chimiques commandent aux muscles des artères pénienues de se relâcher : le sang remplit le corps spongieux et les deux corps caverneux du pénis. Lorsqu'ils sont engorgés, ils compriment les veines qui, normalement, drainent le sang du pénis : le sang est piégé dans les corps

L. CET HERMES DE LA GRECE ANTIQUE, vieux de 2 500 ans illustre les connexions entre le cerveau et le pénis qui font aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches

2. L'ERECTION est orchestrée par le système nerveux central. Son inhibition continue par le système nerveux sympathique (en bleu) est supprimée durant le sommeil paradoxal, lorsque les neurones du *locus coeruleus* sont au repos : des érections se produisent spontanément. Le noyau paraventriculaire inhibe aussi les érections. En revanche, le système nerveux parasympathique (en rouge) est excitateur : les stimuli tactiles ou ceux que reçoit le cortex sont traités dans le noyau paraventriculaire et dans l'aire préoptique médiane, entraînant une érection. Certaines érections réflexes naissent dans le centre inducteur de l'érection de la moelle épinière, situé entre la douzième vertèbre thoracique et la troisième sacrée.



spongieux et caverneux, ce qui déclenche une érection.

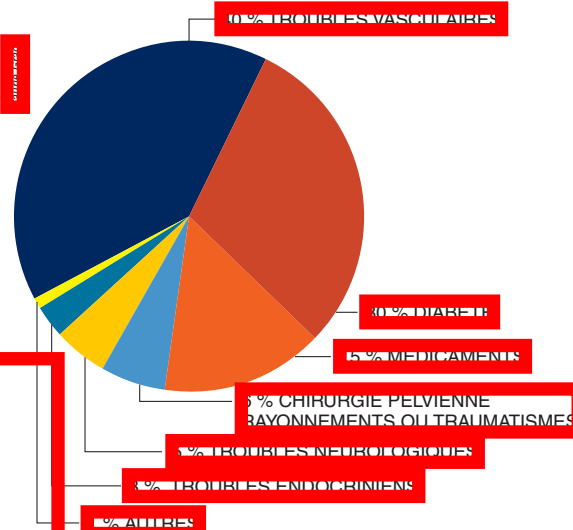
Des muscles lisses et des nerfs tapissent l'intégralité du pénis tandis que les cellules endothéliales recouvrant les vaisseaux sanguins et les capillaires sinusoides (les espaces du corps caverneux) sécrètent des substances qui participent au relâchement et à la contraction des cellules musculaires lisses adjacentes.

Le sang afflue vers le pénis, véhiculé par les deux artères honteuses, qui émergent du pubis, puis se divisent en deux branches plus petites, l'artère dorsale et l'artère caverneuse, qui traversent le pénis. Ces vaisseaux sanguins relativement étroits peuvent s'obstruer dans certaines maladies cardiovasculaires responsables d'un rétrécissement artériel, telles que l'hypertension et l'athérosclérose. Les maladies cardiovasculaires sont fréquentes dans les sociétés industrialisées et leurs conséquences délétères sont aggravées par le diabète et par le tabagisme ; il en résulte parfois une diminution de l'irrigation du pénis, la cause la plus fréquente du dysfonctionnement érectile organique.

Lorsque le pénis est flaccide, la pression sanguine dans les sinus est faible comparée à d'autres organes ; elle est de quelques millimètres de mercure et le flux sanguin de quelques millilitres par minute.

En plus de l'oxyde nitrique et de l'acétylcholine, les mécanismes de l'érection dépendent des concentrations de certains ions dans les cellules musculaires lisses. Par exemple, le neurotransmetteur noradrénaline entraîne l'augmentation de la quantité d'ions calcium dans les cellules qui, sous son influence, se contractent. Les hommes anxieux, frileux ou effrayés sécrètent de grandes quantités de noradrénaline et les muscles lisses du pénis se contractent, et le pénis raccourcit. Au contraire, lorsque des ions potassium s'échappent d'un muscle lisse, le champ électrique qui en résulte empêche l'entrée des ions calcium et entraîne un relâchement des muscles lisses.

Durant une érection, le pénis ne reçoit pas seulement des signaux nerveux, mais en transmet également vers la moelle épinière et vers le cerveau grâce à ses nombreux récepteurs tactiles spécialisés. Ainsi, bien que le pénis ne «pense» pas, il informe le cerveau



3. Le dysfonctionnement érectile est dû aussi bien à des facteurs psychologiques, tel le stress, qu'à des facteurs physiologiques. Parmi les problèmes vasculaires, les plus fréquents

et la moelle épinière de ses sensations. Après l'orgasme, ou lorsque l'excitation diminue, l'érection s'arrête rapidement et le système nerveux sympathique limite de nouveau le flux sanguin vers le pénis qui redevient flaccide.

A l'inverse, l'inhibition du système nerveux sympathique améliore les érections. Par exemple, les érections nocturnes se déroulent essentiellement pendant le sommeil paradoxal, phase au cours de laquelle le sujet rêve. Les neurones sympathiques sont au repos dans le locus coeruleus, une zone du tronc cérébral qui relie le cerveau à la moelle épinière. Lorsque ce centre cérébral sympathique est au repos, les voies proérectiles prédominent, entraînant les érections nocturnes. De telles érections seraient des «mécanismes de recharge des batteries» pour le pénis car elles augmentent le flux sanguin qui apporte ainsi davantage d'oxygène à l'organe. Ces épisodes d'érections nocturnes touchent également les femmes, chez qui, quatre ou cinq fois par nuit, pendant le sommeil paradoxal, les lèvres, le vagin et le clitoris se gorgent de sang.

Du sacré au honteux

Certaines érections, nommées érections réflexes, naissent dans la moelle épinière. De même que le contact d'un doigt avec une flamme entraîne le retrait rapide de la main, une stimulation physique du pénis déclenche parfois une reflexe médullaire d'érection. La reproduction étant indispensable à la survie de l'espèce, l'érection est ancrée dans

les circuits réflexes du système nerveux de l'homme.

En 1949, Herbert Talbot a étudié des soldats, blessés au cours de la Seconde Guerre mondiale, atteints de lésions médullaires. Ces observations ont confirmé que ces lésions ne perturbent pas l'érection, bien que la moelle épinière soit la voie principale des informations qui circulent entre le cerveau et les nerfs périphériques. Lorsque la moelle épinière est endommagée, la circulation de l'influx nerveux peut être interrompue de multiples façons, en fonction de la localisation et de l'étendue de la lésion. Pourtant, ces hommes paralysés et incapables de commander de nombreuses fonctions corporelles

conservent leur capacité érectile.

Ces observations, ainsi que celles effectuées sur des animaux de laboratoire dès les années 1890, ont mené à la découverte d'un «centre inducteur de l'érection» localisé dans les segments sacrés de la moelle épinière (c'est-à-dire juste au-dessus du coccyx). Stimulé, le pénis envoie des signaux le long du nerf honteux vers ce centre de l'érection. Ces signaux activent des neurones intermédiaires nommés interneurons, qui à leur tour, stimulent les neurones parasympathiques voisins. Ces neurones transmettent des signaux qui induisent l'érection, de la moelle vers les vaisseaux sanguins pénien. Tant que cet arc réflexe est intact, l'érection est possible.

Les freins cérébraux

D'autres observations de lésions de la moelle épinière ont montré que, de façon étonnante, lorsque le cerveau est déconnecté du centre inducteur de l'érection, les érections sont souvent plus fréquentes et requièrent une stimulation tactile moindre qu'avant la blessure. Par exemple, en 1979, Benjamin Sachs, de l'Université du Connecticut, a trouvé que, chez le rat dont la moelle épinière est sectionnée, les érections sont dix fois plus nombreuses et les animaux entrent en érection beaucoup plus rapidement (le temps nécessaire est diminué de 94 pour cent).

En 1990, on a identifié une aire cérébrale qui freine les érections à médiation médullaire : il s'agit d'un groupe de neurones, nommé noyau paraventriculaire, situé dans le cerveau

postérieur (une partie ancienne du cerveau) du point de vue de l'évolution, qui commande les fonctions de base telles que la pression artérielle et le rythme cardiaque). Lorsque ce groupe de neurones est détruit, l'inhibition disparaît : les érections sont plus fréquentes et plus vigoureuses.

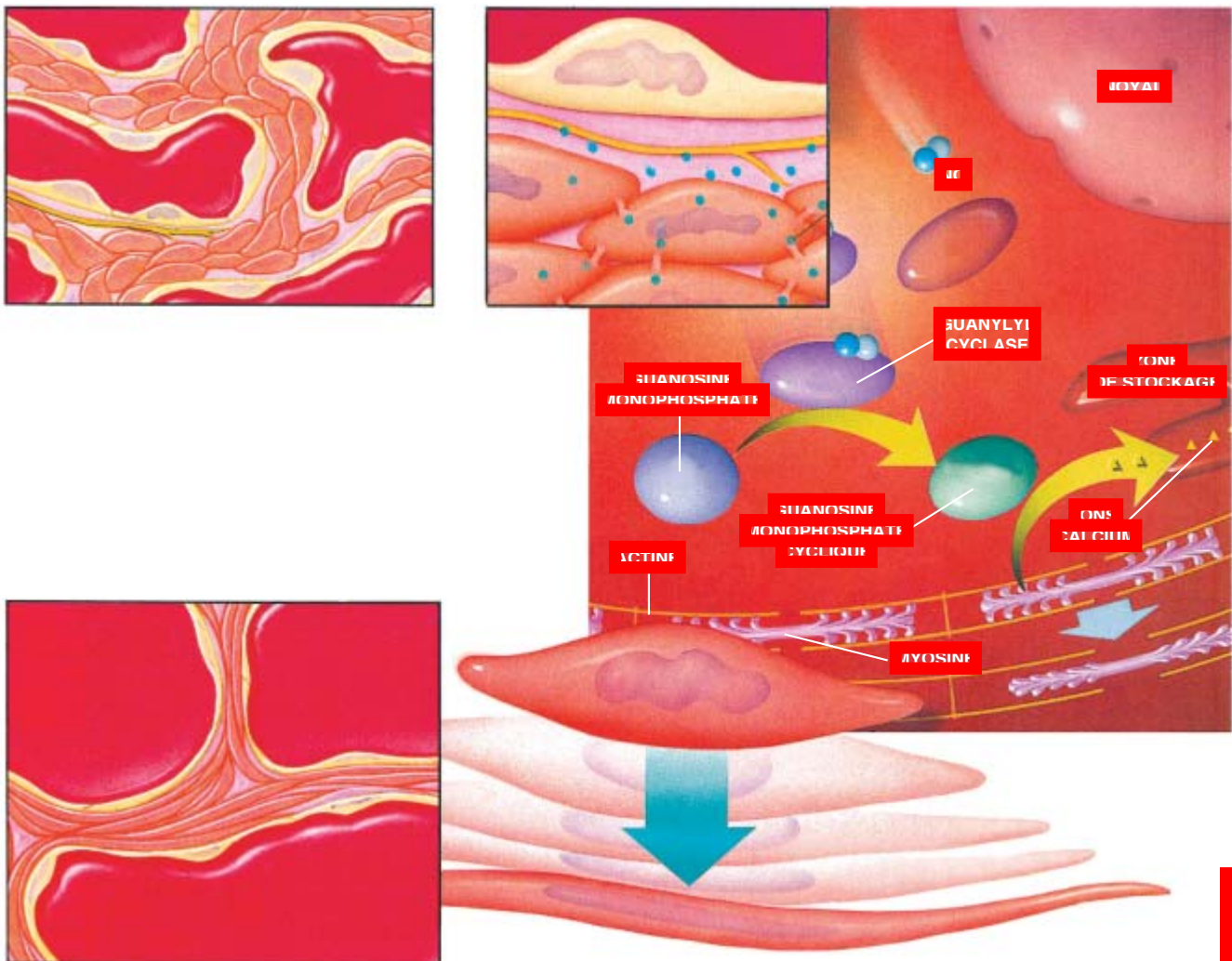
Les biologistes ont ensuite découvert que la plupart des neurones du noyau paraventriculaire envoient leur axones vers les neurones du centre inducteur de l'érection : là, les terminaisons nerveuses du noyau paraventriculaire libèrent un neurotransmetteur, la sérotonine, qui inhibe les érections en s'opposant aux neurotransmetteurs proérectiles. Ces travaux expliquent un effet secondaire des médicaments sérotoninergiques

comme le Prozac, prescrits pour traiter des dépressions et d'autres troubles mentaux. Ces médicaments sont des inhibiteurs sélectifs de la recapture de la sérotonine, c'est-à-dire qu'ils augmentent les concentrations cérébrales en sérotonine, mais ils ont des effets secondaires délétères : ils retardent ou bloquent l'éjaculation et, chez la femme, réduisent le désir et raréfient les orgasmes.

Toutefois, ce qui est un effet indésirable chez l'un peut être un traitement chez un autre. Les propriétés inhibitrices des inhibiteurs de la recapture de la sérotonine sont utiles aux hommes ayant des éjaculations précoces, un état dans lequel un homme arrive à l'orgasme trop rapidement, souvent avant la pénétration vagi-

nale ou juste quelques secondes après. Bien que nous n'ayons pas encore tous les éléments pour l'affirmer, les inhibiteurs sélectifs de la recapture de la sérotonine pourraient également traiter des troubles sexuels associés aux pulsions sexuelles excessives ou déviées, telle la pédophilie.

Pourquoi l'évolution a-t-elle produit de tels mécanismes de contrôle ? Selon John Bancroft, de l'Université de l'Indiana, pour la plupart des hommes, cette inhibition cérébrale les préserve des problèmes d'une recherche excessive ou dangereuse du plaisir sexuel. Ces freins internes contribuent peut-être également à éviter que des éjaculations répétées n'épuisent la réserve de spermatozoïdes et ne diminuent la fertilité des hommes.



1. L'ENGORGEMENT commence lorsque, dans le pénis à l'état flaccide (*en haut à gauche*), les fibres des nerfs autonomes (*en haut au centre*) libèrent des molécules d'oxyde nitrique (NO) et d'acétylcholine qui diffusent dans les cellules musculaires lisses (*en haut, à droite*). Ces molécules de NO activent une enzyme, la guanylyl cyclase, qui transforme le guanosine triphosphate en guanosine monophosphate cyclique. Ce dernier autorise l'entrée des ions calcium (Ca^{++}) dans des zones de stockage de la cellule

L'abaissement des concentrations en Ca^{++} entraîne alors une cascade de réactions cellulaires qui aboutit à la séparation des filaments contractiles de la cellule (la myosine et l'actine). Les cellules musculaires lisses se relâchent (*en bas à droite*) et appuient sur les petites veines qui, normalement, drainent le flux sanguin du pénis. Le sang s'accumule dans les capillaires sinusoides (*en bas à gauche*), les espaces entre les cellules musculaires, et le pénis entre en érection.

Inversement, des érections trop longues risqueraient de masquer les autres plaisirs de la vie : une érection qui persiste plus de quatre heures, par exemple, chez des personnes souffrant d'anémie par drépanocytose ou utilisant certaines drogues, est considérée comme une urgence médicale. Nommé priapisme, cet état piège le sang dans le pénis en érection ; les tissus ne sont plus oxygénés, de sorte que des lésions permanentes risquent d'apparaître quand il n'est pas traité rapidement.

Selon J. Bancroft, une inhibition centrale ne doit pas être trop forte, sinon l'homme souffre de dysfonctionnements sexuels, ni trop faible, sinon il risque de présenter des comportements sexuels à haut risque, par exemple ignorer le danger des maladies sexuellement transmissibles.

Les sites cérébraux

De nombreuses régions du cerveau, du cerveau postérieur qui régule les fonctions de base de l'organisme, au cortex cérébral, siège de la pensée et de l'intelligence, contribuent au comportement sexuel. Aujourd'hui, nous pensons que les sites cérébraux qui commandent les fonctions sexuelles forment un réseau unifié plutôt qu'une chaîne de relais. En d'autres termes, le contrôle de l'érection n'est pas organisé en une chaîne de centres de commande, mais est réparti en de multiples sites cérébraux et médullaires. Ainsi, lorsqu'une blessure ou une maladie détruit une ou plusieurs de ces régions, la capacité d'avoir des érections reste souvent intacte.

Un groupe de neurones, nommé noyau préoptique médian, de l'hypothalamus, la zone du cerveau qui relie le système nerveux au système endocrinien et commande des comportements, telle l'alimentation et l'agression, joue un rôle essentiel dans la fonction sexuelle. L'équipe de François Giuliano de l'Université d'Orsay, a récemment montré qu'une stimulation électrique ou chimique de ce noyau préoptique médian provoque des érections chez le rat. Le noyau préoptique médian semble traiter des stimulus en provenance de nombreuses régions cérébrales, contribuant ainsi à organiser et à orienter les schémas complexes du comportement sexuel. Certains pensent que le noyau préoptique médian intervient également dans la reconnaissance du partenaire sexuel. L'hypothalamus contient aussi le noyau paraventriculaire, un autre

Les traitements de l'impuissance

À l'instar de la pilule contraceptive, le Viagra est une révolution pour la sexualité, mais, ici, pour les hommes. Depuis la mise sur le marché du médicament en 1999, des millions d'hommes ont demandé – et obtenu – une prescription de Viagra pour traiter leur impuissance. La ruée sur ce médicament et la volonté des médecins de l'administrer marquent un changement radical dans la façon d'envisager cet état, dont on pensait, il y a quelques décennies, qu'il avait seulement une origine psychologique.

Cette incapacité d'avoir ou de maintenir une érection rend les relations sexuelles difficiles, voire impossibles. Des interventions médicales éprouvées existent depuis plus de 20 ans, mais les récentes découvertes ont incité à trouver de nouveaux traitements et permettent même des thérapies plus ciblées dans le futur.

Le Viagra est devenu un remède universel, prescrit dans 95 pour cent des cas de dysfonctionnement érectile. Toutefois, bien qu'il sorte l'impuissance du domaine des tabous, il occulte des traitements plus sûrs et aussi efficaces.

Les implants

Le premier traitement efficace de l'impuissance était l'implant pénien : utilisé pour la première fois en 1947, il s'agit d'une tige plastique rigide introduite par chirurgie dans le pénis. Ce type d'implant en plastique rigide a permis à certains hommes d'avoir à nouveau des rapports sexuels, mais, dans les années 1960, les implants en silicone ont simplifié l'intervention chirurgicale. L'implant unique de silicone a rapidement été remplacé par des tiges semi rigides, plus proches de l'anatomie.

Peu après, un dispositif gonflable à trois composants a été mis au point : un cylindre souple introduit dans le pénis était gonflé par du sérum physiologique stocké dans une poche abdominale et propulsé par des pressions exercées sur une «pompe» placée dans le scrotum. Un dispositif de vidange permettait le retour à la flaccidité. Les implants sont sûrs, tout fait efficaces, et ne nécessitent pas la programmation des rapports sexuels.

On peut aussi utiliser une pompe à vide, qui fonctionne selon le même principe qu'une machine à traire les vaches. L'air présent dans le compartiment étanche qui entoure le pénis crée un vide qui aspire le sang dans les capillaires sinusoides péniens. Un garrot placé à la base du pénis piège le sang dans la verge lorsque le dispositif de pompage est retiré.

Les injections péniennes

Un progrès notable intervint en 1979, lorsque le chirurgien vasculaire Ronald Virag a injecté accidentellement de la papavérine au lieu de sérum physiologique dans le pénis d'un patient. À sa grande surprise, et probablement à celle du patient, une érection suivit. Cette découverte a mis en évidence que le relâchement des muscles lisses était le mécanisme érectile clé. La papavérine agit très en aval de la cascade des réactions chimiques nécessaires à l'érection : elle augmente la concentration en adénosine monophosphate cyclique (AMPC), une substance qui bloque l'entrée des ions calcium dans les cellules : il en résulte une relaxation des muscles lisses.

D'autres produits injectables sont ensuite apparus, chacun agissant sur le mécanisme érectile à différents stades de la transmission des signaux. Par exemple, la phentolamine bloque la noradrénaline ; les prostaglandines stimulent la production d'AMPC, qui entraîne ensuite le relâchement des cellules, comme la papavérine. Ces substances, qui ont des effets moléculaires différentes, se complètent et, aujourd'hui, on injecte des combinaisons de ces médicaments.

Ces composés injectables, efficaces chez environ 80 pour cent des patients, nécessitent d'être programmés à l'avance : il faut compter dix minutes pour qu'une érection se produise. De plus, ces traitements ont parfois des effets secondaires délétères, telles des lésions dans les corps spongieux et des douleurs dans le pénis.

Un simple comprimé

Comme d'autres découvertes antérieures, l'effet inducteur de l'érection du sildénafil, plus connu sous son nom commercial de Viagra, a été découvert par hasard, lors d'études sur le traitement de l'infarctus par le sildénafil : beaucoup des hommes traités avaient des érections après la prise du médicament !

Le médicament a finalement été abandonné dans le traitement de l'infarctus en raison d'un nombre élevé d'arythmies fatales. En revanche, en tant que traitement de l'impuissance, le Viagra a connu la plus forte progression de vente jamais enregistrée pour un médicament.

Le Viagra inhibe la dégradation du guanosine monophosphate cyclique (GMPC), qui est la dernière molécule de la cascade de réactions chimiques qui mène à l'érection, par une

enzyme nommée phosphodiesterase. En présence de Viagra, l'activité du GMPc se poursuit, et le signal de relâchement des muscles lisses continue à être transmis.

Le Viagra est efficace chez environ 70 pour cent des hommes qui ont une irrigation suffisante du pénis, des nerfs intacts et qui peuvent produire de l'oxyde nitrique, un précurseur du GMPC, libérés lors de la transmission de signaux nerveux vers le pénis : une stimulation sexuelle est nécessaire pour que le Viagra fasse son effet.

Le Viagra agit sur tout l'organisme et a parfois des effets secondaires qui dépendent de la dose, tels une rougeur de la face, des maux de tête, des troubles gastro-intestinaux et une vision teintée de bleu. La pilule bleue met environ une heure à agir. Ce traitement a entraîné quelques décès. Le nombre de décès ne représente qu'une très faible proportion des hommes ayant pris du Viagra, mais quelques cas ont été déplorés, tandis que les autres traitements du dysfonctionnement érectile n'ont jamais causé de décès.

Outre le traitement de l'impuissance, le Viagra a modifié la façon dont on la diagnostique : avant de prescrire le médicament, un médecin évalue le nombre, la durée et l'intensité des érections nocturnes du patient à l'aide d'un dispositif qui détecte les contractions du pénis. Le Viagra sert aussi à déterminer la cause de l'impuissance.

D'autres traitements possibles

Un déséquilibre en hormones sexuelles mâles est parfois la cause de dysfonctionnements érectiles. Des concentrations faibles en testostérone, souvent dues à une anomalie congénitale, à un traumatisme ou à une lésion vasculaire des testicules, sont corrigées à l'aide d'injections intramusculaires mensuelles de l'hormone ou d'une application quotidienne de timbres transdermiques. Un excès d'hormone prolactine, résultant d'une tumeur de l'hypophyse antérieure,

peut être traité par la bromocriptine ou par résection chirurgicale de l'hypophyse.

La Société Pfizer, qui fabrique le Viagra, étudie différents modes d'administration du médicament, par exemple par voie nasale ou par des cachets qui accéléreraient l'absorption et réduiraient le délai d'attente de l'érection. L'apomorphine et la phentolamine sont en cours d'étude. Par ailleurs, le pénis serait un organe bien adapté à la thérapie génique, car externe et facilement accessible. On appliquerait aisément un garrot pour interdire aux gènes injectés de diffuser dans le reste de l'organisme. Les cellules musculaires lisses des vaisseaux sanguins, cibles probables de futures thérapies géniques, se renouvellent lentement : les effets de la thérapie persisteraient pendant plusieurs semaines.

Pour ce faire, on introduirait, dans les cellules péniennes, des gènes qui produiraient les protéines manquantes. Jacob Rajfer, de l'Université de Los Angeles, tente d'introduire un gène dans le pénis pour stimuler la production d'oxyde nitrique lorsque le gène est activé par un stimulant chimique. Dans mon laboratoire, nous étudions l'insertion d'une sous-unité d'un gène qui laisserait sortir les ions potassium des cellules du corps caverneux. Cette modification augmenterait le relâchement des cellules musculaires lisses et rendrait le pénis très sensible à la stimulation. Chez le rat, l'ADN inséré est resté actif pendant plus de quatre mois. Les rats diabétiques et âgés qui ont reçu le gène réagissaient aux stimulus de la même façon que les rats jeunes et sains. Aucun effet secondaire n'a été observé sur ces centaines de rats testés. Ce type de thérapie génique ne présenterait pas de risque et serait durable chez les hommes qui auraient un nouveau des érections spontanées.

Arnold MELMAN est professeur d'urologie
à l'École de médecine Albert Einstein



PARMI LES TRAITEMENTS DE L'IMPUISSANCE, on trouve (dans le sens des aiguilles d'une montre, à partir du haut) une pompe à vide, un implant pénien flexible, les comprimés de Viagra, un

applicateur qui injecte de la prostaglandine dans l'urètre, un implant pénien gonflable et de la prostaglandine injectable (au centre)

Les bases cérébrales du désir sexuel

En collaboration avec le Centre d'études et de recherches médicales par émission de positons (CERMEP) de Lyon, et notamment avec Jérôme Redoute, nous avons effectué deux études pour identifier les régions cérébrales qui s'activent, ou se désactivent, en réponse à une stimulation sexuelle de type visuel. Pour ce faire, nous avons présenté à des sujets masculins trois types d'images : des images sexuellement stimulantes, des images neutres émotionnellement et, à titre de contrôle supplémentaire, des images de type humoristique. De plus, dans la seconde étude, l'intensité des stimuli sexuels visuels augmentait.

L'activation et la désactivation des diverses régions cérébrales ont été enregistrées à l'aide de la caméra d'un tomographe par émission de positons. Cette technique mesure le débit sanguin dans les différentes aires cérébrales : ce dernier reflète localement l'activité cérébrale. En comparant l'activité du cerveau en réaction aux stimulus visuels sexuels et aux stimulus non sexuels, on observe, dans le premier cas, une activation à l'avant et à l'arrière d'une région, nommée gyrus cingulaire antérieur gauche, située à la face interne de l'hémisphère gauche, et disposée autour du corps calleux.

De surcroît, des activations ont été observées dans la partie orbitaire du cortex frontal droit, une aire située au-dessus des orbites et dévolue à l'évaluation du caractère plaisant des sensations ; dans le cortex pariétal sensitif, dans la partie de cette aire correspondant à la sensibilité du pénis ; dans une partie très antérieure du cortex cingulaire antérieur droit ; et, de manière bilatérale, dans trois autres régions nommées le claustrum, le putamen et le thalamus.

A l'inverse, nos travaux ont montré une désactivation des lobes temporaux, caractérisée par une diminution du débit sanguin. Enfin, toutes les régions qui ont été identifiées lors de la première étude l'ont également été lors de la seconde. Par ailleurs, cette seconde étude

atteste d'une corrélation entre le niveau de l'activation de la partie postérieure de l'hypothalamus et le degré de la tumescence pénienne.

De ce deuxième travail, on conclut que l'excitation sexuelle se compose d'un facteur cognitif, d'un facteur émotionnel, d'un facteur motivationnel et d'un facteur physiologique : ces composantes sont interdépendantes.

La composante cognitive consiste notamment en un processus au cours duquel un stimulus est classé dans la catégorie «stimulus sexuel» et évalué quantitativement en tant que tel ; l'activation de la partie orbitaire du cortex

frontal droit correspond sans doute à cette composante. La composante émotionnelle est représentée par le sentiment de plaisir attachée à l'excitation sexuelle, par exemple à la perception des changements corporels spécifiques concomitants, tels que l'érection. L'activation observée dans la partie très antérieure du cortex cingulaire antérieur droit correspondrait à cette composante. La composante motivationnelle comprend les processus qui dirigent l'individu vers un but sexuel, et notamment la perception de l'envie d'exprimer le désir sexuel dans des actes. La zone postérieure du gyrus cingulaire antérieur gauche participe probablement à cette composante. Enfin, la composante physiologique représentée par les réactions viscérales et endocriniennes se traduit par plusieurs modifications (cardiovasculaire, respiratoire, génitale) qui mettent l'individu dans un état physiologique adapté au comportement sexuel. Cette composante intervient dans l'activation de la partie antérieure du cortex cingulaire antérieur gauche et de l'hypothalamus.

En permettant une meilleure compréhension des mécanismes cérébraux de l'excitation sexuelle masculine, ces résultats permettent de mieux identifier et peut-être de mieux traiter les changements fonctionnels cérébraux caractéristiques de certaines pathologies du désir sexuel.

Serge STOLERU (travail de l'Unité 292 de l'INSERM)



Projections des régions activées, à la surface du cerveau

groupe de neurones qui, à l'instar du noyau préoptique médian, envoie et reçoit des messages de différentes parties du cerveau et de la moelle épinière. Lors de l'excitation sexuelle, le noyau paraventriculaire libère de l'ocytocine, une hormone connue depuis longtemps pour son action sur la lactation chez les femmes et sur les contractions utérines lors de l'accouchement. Pour de nombreuses espèces, l'ocytocine est un message chimique d'«amour» qui favorise l'attachement à un partenaire et à une société. Toutefois, chez l'homme, elle est également un neurotransmetteur cérébral proérectile : elle active des voies nerveuses excitatrices qui relient le centre inducteur de l'érection, de la moelle épinière au pénis.

Des centres cérébraux supérieurs moins connus participent aussi à la réponse sexuelle masculine. Serge Stoléru, de l'INSERM, en collaboration avec le Centre d'études et de recherches médicales par émission de positons de Lyon, a récemment utilisé la tomographie par émission de positons pour comparer les parties du cortex cérébral activées par les trois types d'images sexuellement explicites, humoristiques et émotionnellement neutres (par exemple, un documentaire sur l'Amazonie). L'excitation sexuelle active notamment des régions associées aux expériences émotionnelles et au contrôle du système nerveux autonome (voir l'encadré de la page 92).

Troubles de l'érection

De plus, les neurologistes explorent comment des fonctions du cerveau supérieur, tels la mémoire et l'apprentissage, contribuent à la commande des érections. Le psychologue Raymond Rosen, de l'École de médecine Robert Wood Johnson, a montré que des hommes en bonne santé peuvent avoir des érections sur commande en réponse à des images mentales ou à des signaux non sexuels. Dans l'une de ses études, ils utilisent la pensée pour s'exciter eux-mêmes, en échange d'une récompense financière. Lorsqu'on leur présente ensuite leurs performances sur un écran lumineux, ils apprennent rapidement à augmenter leurs érections, sans stimulation physique directe, grâce à l'utilisation d'images mentales et aux fantasmes.

Ainsi, l'apprentissage et la mémoire influent sur l'érection : l'association de l'excitation sexuelle et de l'orgasme



INSTITUT UNIVERSITAIRE DE FRANCE APPEL À CANDIDATURES

Le Collège de France «sans murs» destiné à soutenir le développement de la recherche au plus haut niveau dans les universités françaises, l'Institut universitaire de France accueille pour une période de cinq ans, des enseignants-chercheurs de rayonnement international, professeurs ou maîtres de conférences, qui, tout en assurant leurs cours, se signalent par une activité de recherche exceptionnelle. Il leur permet de bénéficier d'un allègement de leur service d'enseignement et d'un soutien financier à leur recherche, tous deux très significatifs.

Toutes les disciplines présentes dans les universités françaises, sans exception, ont vocation à être représentées à l'Institut universitaire de France.

Les deux-tiers de ses membres appartiennent à des universités situées hors de l'Ile-de-France.

Une nomination à l'IUF ne constitue pas seulement une distinction pour les enseignants-chercheurs sélectionnés. Elle témoigne également de la qualité de la politique de recherche de leur université, à laquelle ils continuent d'apporter leur concours pendant leur séjour à l'IUF.

Chaque promotion annuelle compte 15 membres seniors et 25 membres juniors. La 10^{ème} promotion vient d'être installée, le 14 novembre, par le ministre de l'éducation nationale et le ministre de la recherche.

Cet appel à candidatures concerne la 11^{ème} promotion, dont la nomination prendra effet à la rentrée universitaire 2001.

Les membres seniors de l'IUF, qui doivent être en poste dans une université française depuis plus de cinq ans, sont sélectionnés par un jury international de 23 membres. La candidature directe n'est pas admise : le dossier soumis à l'examen du jury devra être présenté par deux personnalités scientifiques françaises ou étrangères, et être appuyé par au moins cinq lettres de recommandation, dont trois venant de l'étranger.

Les candidats juniors, en poste dans une université française depuis plus de deux ans, doivent être âgés de moins de 40 ans au 1^{er} janvier 2001. Ils peuvent présenter directement leur candidature, qui devra être appuyée par au moins trois lettres de recommandations, dont au moins deux de personnalités scientifiques étrangères. Le jury de sélection compte 12 membres.

Les présentateurs des seniors et les candidats juniors devront faire parvenir les dossiers, à l'attention du président du jury concerné, à l'adresse suivante :

Secrétariat Général de l'Institut universitaire de France

103, boulevard Saint-Michel

75005 PARIS

LE 15 FÉVRIER 2001 AU PLUS TARD

avec un cachet de la poste faisant foi

Les lettres de recommandation confidentielles devront être également envoyées à cette adresse le 15 février 2001 au plus tard.

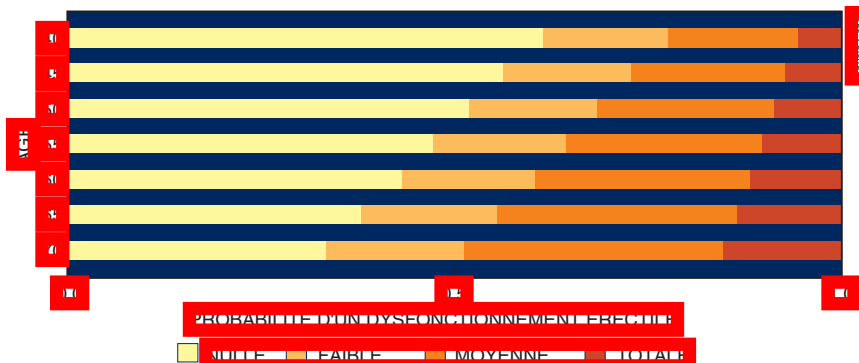
Pour plus d'informations

http://www.cnu.fr/institutions/iuf/iuf_home.htm

téléphone : 01 44 32 92 01

Télécopie : 01 44 32 92 08

Courrier électronique : iuf@agence.cnu.fr



5. L'IMPUISSANCE augmente avec l'âge. Dans 25 ans, la population mondiale aura vieilli et environ 330 millions d'hommes en souffriront

avec des objets évocateurs expliquent pourquoi des objets fétiches, tels les jouets à lanières de cuir, les chaussures à talons aiguilles ou la lingerie, intensifient parfois l'excitation sexuelle.

En comprenant le rôle du système nerveux central dans la commande des érections et des autres fonctions sexuelles, nous espérons découvrir de nouveaux traitements. Le dysfonctionnement érectile, c'est-à-dire l'incapacité d'avoir ou de maintenir une érection satisfaisante pour les relations sexuelles, est de plus en plus fréquent. Nous estimons que le dysfonctionnement érectile touche environ 40 pour cent des hommes de plus de 40 ans et jusqu'à 70 pour cent des hommes de 70 ans : d'ici 25 ans, plus de 330 millions d'hommes dans le monde seront concernés.

Un tel dysfonctionnement est parfois une complication malheureuse d'une ablation de la prostate à cause d'un cancer, car l'intervention endommage les nerfs péniens. Le diabète entraîne également des lésions des nerfs et des vaisseaux sanguins dans le pénis. Enfin, de nombreuses atteintes neurologiques, notamment les lésions de la moelle épinière, la maladie de Parkinson, la sclérose en plaques et les accidents vasculaires cérébraux, sont parfois à l'origine de difficultés d'érection. Par ailleurs, l'humeur influe sur le flux de messages nerveux transmis au pénis : le stress, la dépression, l'anxiété ou la colère perturbent l'érection.

L'apomorphine sera probablement la première d'une nouvelle génération de médicaments qui ont pour cible le système nerveux central, et non le pénis. L'apomorphine imite la dopamine et améliore les érections en se fixant sur des récepteurs spécifiques des cellules nerveuses du noyau paraventriculaire et du noyau préoptique médian : ainsi, les voies proérectiles sont activées. Bien que le composé ait

été utilisé en médecine depuis plus d'un siècle pour le traitement, notamment de la maladie de Parkinson, ce n'est qu'au milieu des années 1980 que des neurologistes l'ont administré pour traiter le dysfonctionnement érectile. Ensuite, des études cliniques sur plus de 3 000 hommes ont montré que l'apomorphine traite avec succès de nombreux types de dysfonctionnement érectile, mais qu'elle n'est pas dénuée d'effets secondaires indésirables. Le Viagra, le médicament le plus prescrit pour le dysfonctionnement érectile (voir l'encadré des pages 90 et 91), provoque parfois des maux de tête, des congestions nasales et des rougeurs de la face. L'apomorphine entraîne quelquefois des nausées au début du traitement. Certains hommes seront peut-être plus efficacement traités par l'association de l'apomorphine et de traitements agissant directement sur le pénis.

Sexe et sexes

On sait aujourd'hui que le dysfonctionnement sexuel est fréquent tant chez les hommes que chez les femmes, mais qu'on peut le traiter. Une récente enquête a montré que le nombre de femmes atteintes de problèmes sexuels

est supérieur à celui des hommes : 43 pour cent contre 31 pour cent.

Notre laboratoire mène une étude clinique pour déterminer si l'apomorphine augmente l'excitation sexuelle de ces femmes. Un dispositif qui produit une légère aspiration au niveau du clitoris est à l'étude ; son évaluation sur l'amélioration des sensations sexuelles est en cours.

Ces travaux révèlent certaines similitudes entre les deux sexes dans la commande de l'excitation, de l'orgasme et de diverses fonctions sexuelles par le système nerveux central. Par exemple, les hommes et les femmes ont des excitations nocturnes, et les uns et les autres souffrent de dysfonctionnement sexuel quand ils sont traités par des inhibiteurs sélectifs de la recapture de la sérotonine. Bien sûr, il y a aussi des différences : par exemple la période postorgasme réfractaire : cette durée entre un orgasme et une nouvelle excitation est quasi nulle chez les femmes, mais peut durer plusieurs heures chez les hommes.

Les dernières décennies ont bouleversé les recherches sur l'érection, mais aussi les attitudes face à la santé sexuelle : il y a seulement quelques années, le dysfonctionnement érectile n'était pas traité. Aujourd'hui, cet état et d'autres problèmes sexuels sont plus ouvertement reconnus, et l'on en parle. Des millions d'hommes sont soignés pour leurs troubles de l'érection, parce que la santé sexuelle a aujourd'hui droit de cité et que l'on dispose de traitements plus efficaces et plus pratiques. Dans un futur proche, l'éventail des thérapies pour les hommes et pour les femmes s'élargira : elles prendront en compte le rôle du cerveau dans le contrôle de notre sexualité, et répondront aux besoins spécifiques des deux sexes. Le bien-être sexuel passera par celui du corps et de l'esprit.

Irwin GOLDSTEIN est urologue à l'Université de Boston.

A.L. BURNETT et al., *Nitric Oxide : A Physiologic Mediator of Penile Erection*, in *Science*, vol. 257, pp. 401-403, 17 juillet 1992.

S.E. LERNER et al., *A Review of Erectile Dysfunction : New Insights and More Questions*, in *Journal of Urology*, vol. 149, n° 5, partie 2, pp. 1246-1255, mai 1993.

H.A. FELDMAN et al., *Impotence and its Medical and Psychological Correlates : Results of the Massachusetts Male Aging Study*, in *Journal of Urology*, vol. 151, n° 1, pp. 54-61, janvier 1994.

F. GIULIANO, O. RAMPIN, G. BENOIT et A. JARDIN, *Neural Control of Penile Erection*, in *Urology Clinics of North America*, vol. 22, n° 4, pp. 747-766, novembre 1995.

K. MCKENNA, *The Brain Is the Master Organ of Male and Female Sexual Function*, in *International Journal of Impotence Research*, vol. 11, supplément 1, pp. 548-555, 1999.

E.O. LAUMANN, A. PAIK et R.C. ROSEN, *Sexual Dysfunction in the United States : Prevalence and Predictors*, in *Journal of the American Medical Association*, vol. 281, n° 6, pp. 537-544, 10 février 1999.

L'explication tient sur deux lignes
 $S = (97/100) \times (1 + 3/100 + (3/100)^2 + (3/100)^3 + \dots)$
 $= (97/100) / (1 - 3/100) = (97 \times 100) / (97 \times 100) = 1$
 N'oublions pas que $0,99999\dots = 1$, car l'écart entre $0,99999\dots$ et 1 est plus petit que $0,1$, mais aussi plus petit que $0,01$ et plus petit aussi que $0,001$, etc. L'écart est plus petit que tout nombre positif, il est donc nul. D'où l'égalité.

Voici une addition infinie due à Frédéric De Ligt. On part de 1 et on multiplie par 3 en décalant d'un chiffre vers la droite :

```

1
3
9
27
81
243
729
2187
.....
142857142857
    
```

A nouveau, ce sont les chiffres de $1/7$ que je vous laisse démontrer.

L'addition suivante, de Jean Blanchard prouve que l'informatique qui fait un usage incessant des nombres 64, 256, 1024 et des autres puissances paires de 2 est bien une œuvre du diable... à moins que cela ne prouve qu'en cherchant bien on peut faire apparaître 666 partout où on le veut.

On part de 64 et l'on multiplie par 4 en décalant de deux chiffres vers la droite :

```

64
256
1024
4096
16384
262144
.....
6666666666666666
    
```

Tomber sur une suite périodique de décimales dans de grandes additions de cette sorte n'a rien d'étonnant. La réalité est même que, ne pas tomber sur une suite périodique de chiffres est impossible.

En effet, si vous écrivez un nombre entier quelconque sur la première ligne du tableau et qu'ensuite, pour obtenir les autres lignes, vous le multipliez par un nombre entier choisi une fois pour toutes en effectuant un décalage vers la droite d'un nombre constant de cases, alors vous obtiendriez la somme d'une série géométrique, somme qui sera un nombre rationnel (de la forme p/q avec p et q entiers) et donc possèdera un développement décimal périodique.

Résolution de l'énigme 2

La seconde énigme est plus difficile, car l'addition est infinie à gauche, chose qui apparemment n'a pas de sens. Parmi les solutions des lecteurs, certaines étaient incomplètes ou fausses, et les solutions complètes étaient souvent assez longues (deux pages ou plus). La solution de Jean Paul Hermann est à la fois élémentaire

2. LES NOMBRES DECADIQUES ET LES OPERATIONS SUR CES NOMBRES

Les nombres décadiques sont les nombres qu'on obtient en s'autorisant à placer une infinité de chiffres avant la virgule et un nombre fini de chiffres après la virgule (pour les nombres réels la règle est inverse : un nombre fini de chiffres avant la virgule, et un nombre infini de chiffres après la virgule). Exemples : $\dots 1111111,111$ $\dots 13131313,99332$

L'addition des nombres décadiques n'a pas de mystère :

```

...242424242
+...111111111
...353535353

...888888,888
+ ...111111,112
...000000,000
    
```

Toutefois, la seconde addition montre que l'opposé du nombre $\dots 888888,888$ est le nombre $\dots 111111,112$, autrement dit que : $-\dots 888888,888 = \dots 111111,112$. Vous pouvez vérifier de même que : $-\dots 999999999 = 1$ et que $-123 = \dots 999999877$. Plus généralement : $-\dots edcba = \dots (9 - e)(9 - d)(9 - c)(9 - b)(10 - a)$

Le résultat d'additions infinies de nombres décadiques peut surprendre :

```

          9
+         90
+        900
+       9000
+      90000
+
= 99999999999
    
```

Or $\dots 99999999999 + 1 = 0$. Nous avons l'étrange résultat :

$9 + 90 + 900 + 9000 + 90000 + \dots = -1$

Puisque bien sûr : $\dots 99999999999 = 9 \times (\dots 11111111111)$, on a donc : $\dots 11111111111 = -1/9$. Pour qu'une addition infinie soit possible il faut et il suffit que le nombre de 0 terminant les nombres qu'on additionne augmente toujours. Cela permet de définir la multiplication des nombres décadiques.

La multiplication décadique

Pour faire une multiplication on opère de la même façon qu'habituellement sans jamais s'arrêter, comme indiqué en **a** :

```

a
242424242
x ...111111111
... 24242424242
... 24242424242
... 24242424242
... 24242424242
... 24242424242
... 24242424242
.....
...528615286152862

242424242
x ...13131313
...27272726
...42424242
...27272726
...42424242
...27272726
.....
???777489746
    
```

On montre que si on multiplie deux nombres décadiques périodiques entre eux, alors on obtient un nombre décadique périodique. En fait les nombres décadiques périodiques sont les fractions (voir la figure 5). On vérifie, en effectuant les multiplications : $\dots 242424242 \times 33 = \dots 111111111 \times 9$ et $\dots 528615286152862 \times 297$, que : $\dots 24242424242 = -42/99 = -14/33$; $\dots 1111111111 = -1/9$; $\dots 528615286152862 = 42/891 = -14/297$. La période d'un produit peut être longue : celle du produit indiqué en **b** est de longueur 66, et le résultat de la multiplication est égal à $\dots sssss6$ où $s = 594429139883685338230792776247321701867156412610958065503520048974$.

La division décadique

```

...3333333333333333
-...6363636363636363
= ...6969696969696970
...696969696969697
-...8484848484848484
= ...848484848484850
...84848484848485
.....
...12121212121212121
...428571428571428573
    
```

On vérifie bien sûr que : $\dots 12121212121212121 / \dots 428571428571428573 = \dots 3333333333333333$

On considère le dernier chiffre, 3. On soustrait donc $3 \times \dots 212121212121 = \dots 6363636363636363$ à $\dots 3333333333333333$, pour faire apparaître un zéro en dernière position. On trouve $\dots 696969696970$. On efface le zéro : $\dots 69696969697$. Comme le dernier chiffre est 7, on soustrait donc le produit $7 \times \dots 212121212121 = \dots 4848484847$. On trouve $\dots 84848484850$. On efface le zéro ce qui donne $\dots 8484848485$; le dernier chiffre est 5. On soustrait alors le produit $5 \times \dots 212121212121 = \dots 60606060605$. Etc.

LA SÉRIE GÉOMÉTRIQUE REVISITE

La démonstration de l'identité $1+X+X^2+\dots+X^n = (1-X^{n+1})/(1-X)$ est facile. Il suffit d'établir que : $(1+X+X^2+\dots+X^n)(1-X) = (1-X^{n+1})$, ce qui est évident, car : $1+X+X^2+\dots+X^n(1-X) = (1+X+X^2+\dots+X^n) \times 1 - (1+X+X^2+\dots+X^n) \times X$
 $= (1+X+X^2+\dots+X^n) - (X+X^2+\dots+X^{n+1}) = 1 - X^{n+1}$.
En résulte que, si X^{n+1} converge vers zéro, alors : $1+X+X^2+\dots+X^n \dots = 1/(1-X)$

Distinguons deux cas :
Nombres réels. Avec les nombres infinis à droite (dénommés nombres réels : ce sont ceux que tout le monde connaît et utilise), X^{n+1} converge vers 0 si, et seulement si, la valeur absolue de X est inférieure à 1. La formule de la série géométrique donne en particulier que : $1 + 1/2 + 1/4 + \dots = 2$. Elle donne aussi : $0,999999\dots = 0,9 + 0,09 + 0,009 + \dots = 9/10 \quad (1 + 1/10 + 1/10^2 + \dots + 1/10^n + \dots) = 9/10 \quad 1/(1-1/10) = 1$.

Nombres décadiques. Une suite x_n de nombres décadiques converge vers 0 si et seulement si le nombre des zéros à la fin de x_n devient de plus en plus grand quand n tend vers l'infini, comme c'est le cas avec la suite : 1, 20, 400, 8000, 160000, ..., 20^n . N'importe quelle suite du type $(k \times 10)^n$ tend donc vers 0 à l'infini. Il en résulte que, si X se termine par au moins un zéro (exemple : $X=20$), alors la série géométrique $1+X+X^2+\dots$ est une série décadique convergente et a pour somme : $1/(1-X)$.
Dans le cas où $X=20$, on a $1+20+20^2+\dots = 1/(1-20) = -1/19$.
On retrouve aussi que : $\dots 99999 = 9 \times \dots 11111 = 9(1+10+100+1000+\dots) = 9 \times 1/(1-10) = 9 \times (-1/9) = -1$.

et élégante. Son raisonnement utilise la formule de la somme des termes d'une série géométrique finie (voir la figure 3) : $1+X+X^2+X^3+\dots+X^{n-1} = (X^n-1)/(X-1)$.

Considérons les n premières lignes du tableau mystérieux. En complétant par des zéros à droite, leur somme est : $S(n) = 1 + 20 + 20^2 + 20^3 + \dots + 20^{n-1} = (20^n - 1)/(20 - 1) = 10^n \times 2^n / 19 - 1/19$.

Remarquons maintenant que, lorsque n est multiple de 18, alors le nombre 2^n est de la forme $19k + 1$ pour un certain entier k . Ce point délicat s'établit en notant que $2^{18} = 262144 = 13797 \times 19 + 1$, et en remarquant qu'en multipliant deux nombres de la forme $19k + 1$ l'un par l'autre, on obtient encore un nombre de la même forme. Donc, lorsque n est multiple de 18, il existe un entier k tel que : $S(n) = 10^n \times (19k + 1)/19 - 1/19 = 10^n \times k + 10^n/19 - 1/19$.

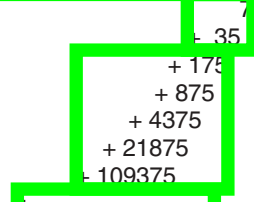
Dans cette somme, le terme $10^n \times k$ n'a pas d'importance pour les n derniers chiffres (c'est la généralisation d'une évidence : additionner 2300000 à un entier n'en modifie pas les cinq derniers chiffres).

Donc lorsque n est un multiple de 18, l'addition des n premières lignes donne, dans les n dernières colonnes, des chiffres qui sont ceux du nombre $10^n/19 - 1/19$, chiffres qui sont ceux qu'on obtient quand on fait la division de 1 par 19 (car on obtient les mêmes chiffres quand on divise 1 par 19 ou 10 par 19 ou 100 par 19, etc.). Le $-1/19$ fait disparaître les chiffres situés après la virgule de $10^n/19$.

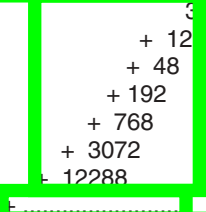
Les n derniers chiffres du tableau sont donc ceux que donnent les N premiers chiffres de la division de 1 par 19. En prenant des n de plus en plus grande ($n=18, n=36, n=54$, etc.), on a l'explication complète de la coïncidence. (Une

autre solution plus simple encore, mais utilisant les nombres décadiques, est proposée plus loin).

Autres coïncidences du second type
Frédéric de Ligt et Raymond Millon proposent cette jolie variante. On part de 7 et on multiplie par 5 en décalant d'un chiffre vers la gauche :



...142857142857142857, chiffres de $1/7$
Frédéric de Ligt a aussi découvert une addition pour $1/13$. On part de 3 et on multiplie par 4 en décalant d'un chiffre vers la gauche :



...076923076923076923, chiffres de $1/13$
La justification de ces coïncidences du second type peut se faire à chaque fois sur le modèle de l'explication donnée plus haut. Cependant, cela semble un peu compliqué. La pratique de ces additions infinies sur la gauche suggère que nous pourrions bien généraliser les nombres habituels et en considérer qu'ils seraient infinis vers la gauche. Mais est-ce que tout cela est possible et possède un sens ? Ne va-t-on pas obtenir des résultats absurdes, voire des contradictions ?

C'ÉTAIT IL Y A CENT ANS

Eh bien non, on ne tombera sur aucune contradiction en manipulant des nombres infinis vers la gauche, car il existe une théorie mathématique qui leur donne un sens et les étudie. Si une contradiction était découverte dans cette théorie, elle se traduirait par une contradiction en théorie des ensembles, et cela est jugé improbable.

Cette théorie, qui, précisons-le, n'a rien à voir avec la théorie des nombres infinis de Cantor (ordinaux et cardinaux) est vieille d'un peu plus d'un siècle. Elle est née dans la tête du mathématicien allemand Kurt Hensel à la fin du XIX^e siècle et est devenue un outil important en arithmétique, où elle sert en particulier à résoudre certaines équations diophantiennes (ce sont des équations à coefficients entiers). Cette théorie est peu enseignée, alors qu'elle ouvre sur un monde de nombres aux propriétés étranges qu'on pourrait utiliser dans les classes des collèges et des lycées pour prouver aux élèves que les mathématiques sont un univers féérique.

Contrairement aux nombres habituels qui peuvent se convertir d'une base de numération à l'autre sans perdre leur identité, les nombres infinis à gauche ne supportent pas le changement de base. Si vous choisissez de travailler en base de numération décimale (ce que nous allons faire), il faut toujours y rester, et les résultats changent si vous changez de base. Dit autrement, il y a autant de catégories de nombres infinis à gauche qu'il y a de bases possibles.

Les nombres infinis à gauche en base 10 sont les nombres décadiques. On les a parfois dénommés *brenoms*, qui signifie nombre en verlan, car ils s'étendent vers la gauche sans limite, comme les nombres habituels (les nombres réels) s'étendent vers la droite sans limite. Lorsqu'on se place en base n plutôt que 10, on parle de nombres *n*-décadiques (la base s est bien sûr particulièrement douloureuse).

On peut leur mettre une virgule suivie d'un nombre fini de chiffres, ce qui est exactement la règle symétrique qu'on a avec les nombres réels : une infinité de chiffres après la virgule, mais seulement un nombre fini de chiffres avant la virgule. Un nombre décadique est donc par exemple :

...179179179.34:
Les trois petits points signifiant qu'on répète infiniment la séquence 179 vers la gauche. Les nombres décadiques qu'on n'ont rien après la virgule sont les entiers décadiques.

Additionner les nombres décadiques ne pose pas de difficulté (voir la figure 1).

14141414 51

...88888888,888

...03030303,398

On effectue l'addition en opérant comme à l'habitude le report des retenues qu'on imagine avoir le temps de poursuivre tranquillement jusqu'à la fin des temps.

Les nombres que nous avons pris en exemple sont périodiques, mais c'est par simple commodité, car on peut très bien en imaginer de non périodiques comme :

.... 1000001000010001001011

.... 2648323979853562951413

Une propriété étrange apparaît quand nous essayons certaines additions :

...9999999991	+...123123,123
+...876876,877	
=...0000000000	=...000000,000

Nous pouvons obtenir 0 en additionnant deux nombres décadiques. Cela signifie simplement que ce que nous dénommons l'opposé d'un nombre décadique n'a pas besoin du signe - pour exister. L'opposé de 9, que nous notons habituellement -9, peut aussi s'écrire ici ...9999999991. Vous vérifierez sans peine que tout nombre décadique possède un opposé que l'on obtient en complémentant

tant ses chiffres (on remplace le dernier chiffre c par $10 - c$ et chaque autre chiffre par $9 - c$), ce qu'on écrit sous forme de règle : ...edcba = ... $(9 - e)(9 - d)(9 - c)(9 - b)(10 - a)$.

Cette façon de trouver l'opposé d'un nombre décadique montre que, dans le monde décadique, la notion de nombre positif n'a pas de sens. C'est une grande différence entre les nombres réels (infinis à droite) et les nombres décadiques (infinis à gauche), qui a pour conséquence qu'on ne sait pas classer les nombres décadiques d'une façon intéressante. Il peut paraître bizarre que des nombres

L'UNIVERS ÉTRANGE DES NOMBRES DÉCADIQUES

Le monde des nombres décadiques se distingue du monde des nombres réels sur plusieurs points importants, mais qui n'empêchent pas ce monde de nombres infinis d'être parfaitement cohérent.

Nombres automorphes

Il existe des solutions autres que 0 et 1 à l'équation $X^2 = X$. De tels nombres sont dénommés nombres automorphes. Il y a deux nombres automorphes, dont voici les 90 derniers chiffres :

$X_1 = \dots 108169802938509890062166509580863811000557423423230896109004106619977392256259918212890625$.

$X_2 = \dots 891830197061490109937833490419136188999442576576769103890995893380022607743740081787109376$.

Concrètement, cela signifie par exemple que, lorsque vous multipliez par lui-même un nombre se terminant par les dix derniers chiffres de X_1 , soit 8212890625, vous obtenez un nombre se terminant par les mêmes chiffres (il en va de même, bien sûr, pour les 20 derniers chiffres ou pour un nombre quelconque de chiffres pris à la fin de X_1 ou de X_2).

Un procédé général pour connaître les chiffres de X_1 consiste à calculer les n derniers chiffres de 5 élevé au carré n fois de suite (soit 5^{2^n}). Le second nombre automorphe est lié au premier par la relation $X_1 + X_2 = 1$.

Diviseurs de zéro, nombres non inversibles

Lorsqu'on prend deux nombres réels non nuls, leur produit est non nul : on dit que, dans le monde des nombres réels, il n'y a pas de diviseurs de zéro. Dans le monde des nombres décadiques, en revanche, il y a des diviseurs de zéro, car le produit $X_1 \cdot X_2 = X_1(1 - X_1) = X_1 - X_1^2 = 0$.

Les nombres X_1 et X_2 ne sont pas nuls, mais leur produit est nul ! Concrètement, cela signifie qu'en multipliant le nombre composé des 20 derniers chiffres de X_1 avec celui composé des 20 derniers chiffres de X_2 , vous obtenez un nombre dont vous savez par avance que ses 20 derniers chiffres seront des 0 :

$92256259918212890625 \times 07743740081787109376 = 71440849772443471020000000000000000000$

Il existe bien d'autres diviseurs de zéro. En effet, le produit d'un nombre décadique Y quelconque par X_1 ou X_2 est encore un diviseur de zéro, puisque : $(Y \cdot X_1) \cdot X_2 = Y \cdot (X_1 \cdot X_2) = Y \cdot 0 = 0$.

Remarquons aussi que les diviseurs de zéro ne peuvent pas posséder d'inverse. Supposons que X_1 possède un inverse Z , alors : $X_2 = X_2 \cdot 1 = X_2 \cdot (X_1 \cdot Z) = (X_2 \cdot X_1) \cdot Z = 0 \cdot Z = 0$, ce qui est absurde, car X_2 n'est pas nul.

Le fait que certains nombres décadiques ne possèdent pas d'inverse explique que le monde des nombres décadiques est peu utilisé en mathématiques. Si, au lieu de calculer en base 10, on calculait en base p (p un nombre premier) alors les nombres p -adiques qui seraient ainsi définis auraient la propriété que tout nombre non nul possède un inverse, et il n'y aurait plus de diviseur de 0. On dit que, si p est un nombre premier, les nombres p -adiques forment un corps, et cette fois ce corps est très utile en arithmétique.

Racines carrées

Nous savons bien que, dans le monde des nombres réels, une équation de degré n possède au plus n solutions et qu'en particulier un nombre réel possède au plus deux racines carrées. Dans le monde des nombres décadiques, les choses vont différemment. D'abord, un nombre peut posséder jusqu'à 4 racines carrées. Vous vérifierez que $(2X_1 - 1)^2 = 1$, ce qui signifie que 1 possède non seulement les racines carrées 1 et -1 mais aussi les racines carrées $2X_1 - 1$ (et donc $1 - 2X_1$). Les équations de degré d peuvent, elles, posséder jusqu'à d^2 solutions (si, au lieu de se placer en base 10, on se plaçait en base n , n étant un nombre entier ayant k facteurs premiers distincts, alors d^2 deviendrait d^k).

Voici, par exemple, les derniers chiffres de deux racines carrées (autres que $r_1 = 2$ et $r_2 = -2$) de 4 :

$r_3 = \dots 70306307076415563983573520090430974960327148437502$.

$r_4 = \dots 29693692923584436016426479909569025039672851562498$.

Encore une étrangeté : alors que tout nombre entier 0, 1, 2, 3, ... possède une racine carrée dans le monde des nombres réels, il en va autrement dans le monde des nombres décadiques. Le nombre 2 n'a pas de racine carrée, ni 3, ni 5. Le nombre 41 (qui n'est pourtant pas un carré parfait d'entier) possède, lui, quatre racines carrées décadiques. Voici d'ailleurs les derniers chiffres d'une racine carrée décadique de 41 :

$\dots 780284689680810830084469701318156276927163008501664117627064056375743830738554067263241296179$.

Cela signifie que, si vous élevez ce nombre au carré, vous tomberez sur un nombre dont les derniers chiffres seront ...000041. Les nombres entiers inférieurs à 100 qui possèdent des racines carrées dans le monde décadique sont 1, 4, 9, 16, 25, 36, 41, 49, 64, 81 et 89.

5. NOMBRES REELS ET DECADIQUES PERIODIQUES

Si s est une suite finie de chiffres de longueur p , alors le nombre décadique $...ssss$ vaut $-s/(10^p-1)$ et le nombre réel $0,ssss...$, vaut $s/(10^p-1)$. Tout est là.

En effet, d'une part avec des nombres décadiques, $\dots ssss - (10^p \dots ssss) = s$
 exemple, avec $s = 51$, donc $p = 2$, $\dots 515151515151 - 515151515100 = 51$).
 D'autre part, avec des nombres réels, on a : $10^p \text{ 0,ssss... } - \text{ 0,ssss... } = s$
 exemple : $51,51515151... - 0,5151515151... = 51$).

On en déduit que, comme cela se passe dans le monde des nombres réels, les nombres décadiques périodiques à partir d'un certain point sont les quotients de deux entiers naturels (c'est-à-dire les fractions au sens habituel du terme : $12/47$, $-32/1997$, etc.). Il en résulte aussi que le produit de deux nombres décadiques périodiques est toujours périodique.

Ces égalités résolvent les coïncidences posées au début de l'article :

$1+20+400+8000+160000+\dots = 1/(1-20) = -1/19$ (d'après la formule de la série géométrique en décadique). Le calcul en nombres réels de $1/19$ donne un résultat de la forme 0,sss pour une certaine séquence s de chiffres. D'après les deux lignes du haut, la même séquence de s donne l'écriture de $-1/19$ en décadique.

ne se classent pas, et donc ne puissent pas servir à ordonner quoi que ce soit, mais c'est aussi ce qui se passe pour les nombres complexes. Nombre d'autres propriétés des nombres décadiques justifient cependant qu'on les dénomme nombres

La soustraction se définit sans problème soit en généralisant l'opération habituelle, soit en indiquant que soustraire x c'est additionner $-x$, ce qui nous le constatons, revient au même.

$$\begin{array}{r} \dots 2222222222 \\ - \quad \quad \quad 123123,123 \\ \hline \dots 999999,999 \\ = \quad 2222222217 \\ = \quad 123123,124 \end{array}$$

LA MULTIPLICATION

Pour la multiplication, on ne rencontre pas de difficultés particulières non plus. On utilise la méthode usuelle apprise à l'école, qu'on imagine poursuivre à l'infini (voir la figure 2).

Notre exemple porte sur des nombres périodiques, mais il n'y a bien sûr aucune obligation à cela, et la multiplication est définie pour tous les nombres décimaux. Que le produit de deux nombres périodiques le soit aussi est une propriété générale.

L'addition et la multiplication ainsi définies possèdent toutes les bonnes propriétés qu'on attend : $a+b=b+a$, $(a+b)+c=a+(b+c)$, $a \times b=b \times a$, $(a \times b) \times c=a \times (b \times c)$, $(a+b) \times c=a \times c+b \times c$, etc. Le mathématicien dit que l'ensemble des nombres décadiques est un anneau commutatif mais peu importe. Certaines choses surprenantes se produisent :

$765432098765432 \times 9 = 8888888888$

La première des égalités signifie que $\mathbb{Z}$ possède un inverse qui est -2857142857143 , et l'on peut donc écrire :

$$\dots 2857142857143 = 1/7.$$

La question de savoir quels nombres décadiques possèdent un inverse conduit à s'interroger sur ce que serait l'opération de division.

LA DIVISION

Notons d'abord que, grâce au système des virgules, on peut toujours diviser un nombre décadique par 2 et par 5 :

$$\dots 11111111 : 2 = \dots 5555555,5$$

Nous pouvons donc toujours diviser un nombre décadique par n'importe quel nombre de la forme $2^n \times 5^m$.

Pour les autres nombres, en particulier pour tous les nombres infinis ...*dcba*, nous pouvons tenter d'effectuer l'opération de division décadique décrite à la figure 2. Cette opération consiste à faire apparaître des zéros progressivement à droite dans les restes successifs. Un peu d'attention montre que c'est possible si le dernier chiffre *a* du diviseur ...*dcba* donne, lorsqu'on le multiplie par 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, des nombres se terminant par tous les chiffres possibles (0, 1, ... 9 (pas toujours dans cet ordre)).

C'est évidemment vrai si $a = 1$. C'est vrai aussi si $a = 3$, car $3 \times 0 = 0$; $3 \times 1 = 3$; $3 \times 2 = 6$; $3 \times 3 = 9$; $3 \times 4 = 12$; $3 \times 5 = 15$; $3 \times 6 = 18$; $3 \times 7 = 21$; $3 \times 8 = 24$; $3 \times 9 = 27$. On vérifie que c'est encore vrai pour 7 et pour 9, mais pas pour 0, 2, 4, 6, 8.

En résumé l'opération de division décadique peut donc se faire si le dernier chiffre du diviseur $\dots dcba$ est 1, 3, 7 et 9. Dans le cas général où nous considérons la base n à la place de 10, il faut que a soit premier avec n).

Lorsque ce n'est pas le cas, tout n'est pas perdu, nous divisons le numérateur et le dénominateur de la fraction que nous cherchons à calculer par 2 ou par 5 (ce qui est toujours possible) pour faire disparaître du diviseur les chiffres terminaux 0, 2, 4, 5, 6 et 8 qui gênent. Nous espérons trouver, au bout d'un nombre fini d'essais, un dénominateur qui se termine par 1, 3, 7 ou 9. C'est presque toujours le cas. Pour certains nombres décadiques étranges, cependant, jamais nous ne réussissons. En voici deux (la figure 4 explique comment les calculer) :

X₁=...3953007319108169802938509890
062166509580863811000557423423230
396109004106619977392256259918212
390625.

K₂=...6046992680891830197061490109
937833490419136188999442576576769
03890995893380022607743740081787
09376

Le premier est indéfiniment divisible par 5 (jamais on ne trouve un résultat se terminant par 1, 3, 7 ou 9 quand on le divise par 5) le second est indéfiniment divisible par 2.

Ces deux nombres ont une autre propriété remarquable, qui n'a pas d'équivalent dans le monde des nombres réels : leur produit est nul : $X_+ \times X_- = 0$

Nous disons que x_1 et x_2 sont des diviseurs de zéro (et que l'anneau des nombres décadiques n'est pas intègre). Chacun de ces nombres a aussi l'étrange propriété d'être égal à son carré. Nous disons que x_1 et x_2 sont des nombres automorphes. Il n'y en a aucun autre, mis à part bien sûr 0 et 1.

$$(X_1)^2 = X_1; (X_2)^2 = X_2.$$

Bien d'autres propriétés étonnantes des nombres décadiques montrent que l'on peut « compter » sur eux. Le monde des nombres décadiques permet de comprendre en profondeur et sans raisonnement compliqué les additions infinies du second type, qui correspondent à des séries géométriques (comme les additions infinies du premier type correspondaient à des séries géométriques dans le monde des nombres réels). On peut alors sans mal inventer de nouvelles additions infinies comme celle-ci, qui plaira aux superstitieux. On part de 46 et on multiplie par 7 pour chaque nouvelle ligne :

$$\begin{array}{r}
 46 \\
 + 322 \\
 + 2254 \\
 + 15778 \\
 + 119446 \\
 \hline
 66666666
 \end{array}$$

Roger CUCULIÈRE, *A l'horizon de l'arithmétique décimale : les nombres 10 adiques*, in *Pour la Science*, juin 1986.

H.-D. EBBINGHAUS et J. NEUKIRCH, *Les nombres* (chapitre 6), Vuibert, 1998 (uniquement les p -adiques avec p premier).

R. FERRÉOL, *Les brenoms*, Notes d'exposé
communiquées par l'auteur.

M. GUINOT, *Les nombres be-adiques*, IREM de Lyon. 1987.

J. LEFÈVRE, *Les brenoms*, janvier 1994
 Texte à télécharger à l'adresse : www.ens-lyon.fr/~vlefevre (précis, accessible en français, assez complet).

J.-P. SERRE, *Cours d'arithmétique*, PUF
Paris, 1970.



Hex : le jeu des hexagones

IAN STEWART

Quelques connexions gagnantes de ce jeu de stratégie.

Les jeux de société ? Si vous essayez Hex. Ce petit jeu pour deux est aussi captivant que les meilleurs des jeux électroniques et tellement stimulant. On joue plus facilement à Hex depuis qu'un passionné du jeu Australien Cameron Browne, lui a consacré un livre, désormais indispensable à tous les passionnés de la théorie des jeux.

Hex se joue à deux, sur un plateau pavé de cases hexagonales (voir la figure 2). D'ordinaire, ce plateau a la forme d'un losange de 11 cases de côté. Chaque joueur est maître de deux des côtés opposés de ce losange, à l'exception des cases placées aux coins, qui sont propriété commune. L'objectif de chaque joueur est simple : placer un à un ses pions (bleus ou rouges) afin de relier ses deux côtés par une chaîne de pions, que cette dernière soit tortueuse ou qu'elle ait des embranchements ou des boucles. Facile ? Pas tant que cela. Qui a essayé, sait à quel point Hex est subtil.

Le jeu est une invention de Piet Hein, un mathématicien danois du milieu du XX^e siècle, connu aussi pour sa poésie. Apparu pour la première fois dans l'édition du 26 décembre 1942 du journal danois *Politiken*, il fut réinventé par le mathématicien américain John Nash en 1948. Alors étudiant à l'Université de Princeton, Nash était un passionné des jeux, auxquels il consacra de nombreuses recherches. Il obtiendra d'ailleurs le prix Nobel d'économie pour l'application de ses travaux en théorie des jeux à ce domaine. À Princeton, les toilettes pavées de carreaux hexagonaux étaient les seuls endroits où les étudiants passionnés par Hex, mais désargentés, pouvaient se livrer à des duels !

Malheureusement, Hex est presque impossible à trouver dans le commerce. En 1957, Martin Gardner, consacre un article à ce jeu dans les colonnes de

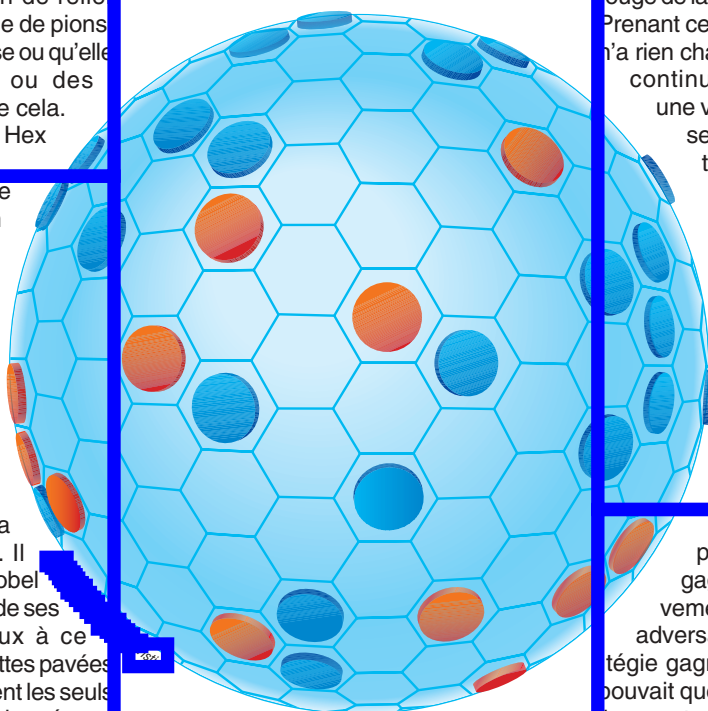
Scientific American : en une semaine Hex devient la nouvelle marotte des laboratoires de mathématiques.

Comment joue-t-on à Hex ? Tout d'abord, il n'y a que 11×11 , soit 121, positions possibles. De plus, dès que l'un des joueurs établit une chaîne, son adversaire ne peut plus en établir : il a nécessairement perdu. En fait, il existe même une façon optimale de jouer qui garantit la victoire au premier joueur, celui qui pose le premier pion de la partie.

La démonstration de ce fait repose sur une méthode curieuse, celle du « voleur de tactique ». Supposons qu'une tactique gagnante existe bien, non pas pour le premier joueur (qui joue les rouges) mais pour le second (qui joue les bleus).

et montrons que cette hypothèse aboutit à un paradoxe. Cette « stratégie gagnante » pour le second joueur est connue des deux adversaires ; par hypothèse, celui qui place le second pion de la partie (le premier bleu) gagne forcément s'il l'applique. Que peut faire le premier joueur pour gagner quand même ? Rien, par hypothèse. Cependant, comme il est humain, donc subjectif, il tente sa chance. Que fait-il ? Il dépose un premier pion rouge, puis, pendant qu'il attend son tour, décide de faire comme s'il jouait en second. Dès ce moment (pour lui-même), il est le second joueur qui applique correctement la stratégie gagnante : dès qu'un pion bleu est placé, le rouge est placé selon la stratégie du second joueur. Le premier pion rouge de la partie devient le « pion oublié ». Prenant cette décision, le premier joueur n'a rien changé pour son adversaire, qui continue de son côté à jouer pour une victoire assurée. On peut alors se dire qu'à un moment de la partie, le premier joueur doit occuper une case déjà prise par le « pion oublié ». Est-ce rédhibitoire ? Non, parce que cette case est déjà occupée par un pion rouge, de la couleur nécessaire pour que la stratégie gagnante soit correctement appliquée : cette position devient stratégique et le premier joueur place alors son pion rouge n'importe où, puis « l'oublie ».

En volant la stratégie du premier joueur, le joueur rouge gagne, quels que soient les mouvements des pions bleus. Or, son adversaire appliquait lui aussi la stratégie gagnante qui, par hypothèse, ne pouvait que le faire gagner, lui aussi. Or il ne peut y avoir deux gagnants. Conclusion : l'hypothèse est fautive. Il n'existe pas de stratégie gagnante qui fasse gagner à coup sûr le joueur qui dépose le deuxième pion de la partie. Rappelons maintenant que Hex se termine toujours par la victoire de l'un des joueurs.



L. Jouez à la balle avec Hex ! Vous avez le choix. Divers jeux d'Hex se pratiquent sur une sphère pavée d'hexagones et de 12 pentagones (lesquels ne peuvent s'apercevoir sous l'angle observé ici). Le premier joueur qui parvient à boucler une chaîne autour d'une ou de plusieurs cases a gagné.

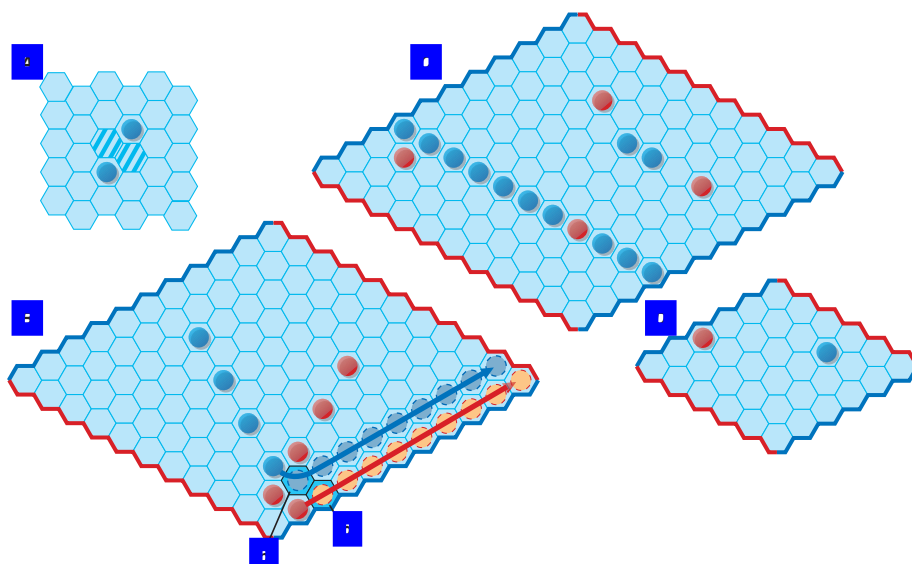
Si c'est le cas et si le second joueur ne peut forcer la victoire, c'est que seul le premier le peut. Ainsi, il existe une stratégie gagnante pour le joueur qui dépose le premier pion.

Cette démonstration semble départir Hex de tout intérêt. Pensez donc, un jeu où le deuxième joueur n'a jamais sa chance! Toutefois, montrer l'existence d'une stratégie gagnante ne revient pas à la découvrir. La stratégie que doit appliquer le premier joueur pour gagner n'est connue que pour un losange d'une dimension maximale de 7×7 . À partir de 8×8 , le joueur qui ouvre le jeu sait qu'en principe il peut gagner à coup sûr, mais il ignore comment. Si, malgré cela, le second joueur trouve cette dissymétrie injuste, il est toujours possible de parfaire Hex en ajoutant une règle : après le premier coup, le deuxième joueur peut décider de remplacer le premier pion par l'un des siens au lieu d'occuper une cellule libre. De cette façon, le premier joueur a à déposer un pion sur le jeu ne sait pas d'avance s'il conservera son avantage théorique.

Analyser à fond Hex occuperait ces colonnes pendant cinq ans. Aussi, vais-je me limiter à deux aspects supplémentaires. Le premier est qu'il n'est pas nécessaire qu'une cellule soit occupée pour qu'elle joue un rôle stratégique. La figure 2a illustre un pont où deux pions bleus, qui ne se touchent pas, sont séparés par deux cellules vides. Aussi longtemps qu'aucune des cellules intermédiaires n'est occupée par un pion rouge, les pions bleus sont déjà quasiment reliés. En effet, si le joueur qui joue les rouges fait une tentative et occupe une des deux cases vides intermédiaires, son adversaire n'a qu'à occuper l'autre pour établir la liaison. Les joueurs d'Hex essaient souvent de construire de tels ponts. Ces derniers n'ont pourtant rien d'imparable. Un pont bleu, par exemple, peut être défait si les rouges parviennent à occuper l'une quelconque des cellules intermédiaires par un coup qui déclenche dans le même temps une menace, contre laquelle les bleus devront impérativement réagir. Le mieux est donc d'empêcher votre adversaire de construire trop de ponts.

De surcroît, on doit avoir bien compris que la solidité d'une chaîne se mesure à celle de son maillon le plus faible. Que faire si votre adversaire peut s'attaquer à votre chaîne avec de grandes chances de succès? Le plus habile est de renforcer le maillon le plus faible ou d'attaquer l'une des chaînes de votre adversaire. Soyez astucieux et dissimulez vos intentions en vous rapprochant insidieusement du maillon faible de la chaîne de votre adversaire.

Une tactique plus compliquée met en jeu la construction d'échelles, lesquelles



2. La tactique de base au jeu d'Hex consiste à bâtir un pont, c'est-à-dire à disposer d'un bord à l'autre une succession de pions dans une série de cases non adjacentes (A). Plus élaborées sont les constructions d'échelles (B). Dans l'exemple illustré en figure C, le joueur des rouges gagne. Finalement, deux problèmes sont proposés aux lecteurs dans les figures C et D. Le tour est aux rouges. Quel coup leur garantit la victoire?

se forment lorsque l'un des joueurs tente de créer une connexion à proximité de l'un des côtés. La figure 2b montre un départ d'échelle, alors que c'est aux bleus de jouer. Les bleus n'ont aucune autre option que celle qui consiste à jouer la cellule p , sinon, les rouges gagnent. Les rouges jouent alors q . Si les bleus continuent à tenter d'établir une connexion vers le côté (bleu), les rouges ne peuvent que les bloquer. Deux lignes (une bleue et une rouge) se dessinent parallèlement au bord bleu. Ce faisant, ils progressent vers le bord rouge opposé, et les rouges finissent par gagner. Cet exemple illustre pourquoi on doit anticiper la formation des échelles afin de les bloquer dès qu'elles commencent. Ainsi, si les bleus avaient placé un pion près du bord plus tôt dans le jeu, ils auraient automatiquement gagné la confrontation.

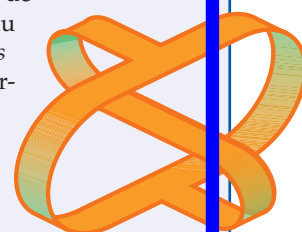
On peut citer d'autres variations sur le jeu d'Hex. La variante en Y na-

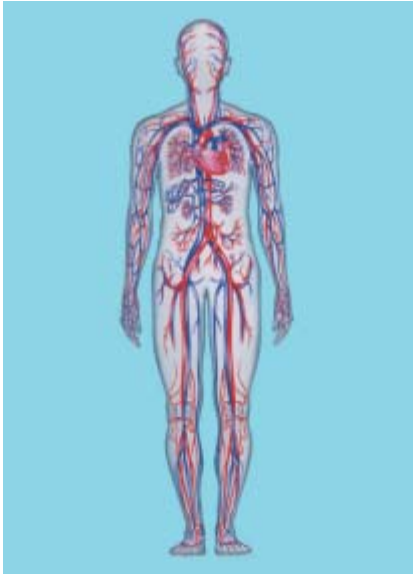
ture, se joue sur un jeu qui a une forme triangulaire, et l'on doit alors relier les trois côtés par une même chaîne. Comme dans le cas du jeu de base (losange 11×11), on ne connaît de stratégie gagnante que pour les jeux n'ayant qu'un petit nombre de cases. Hex peut aussi se jouer sur une sphère pavée d'hexagones et de pentagones (voir la figure 1); le gagnant est le premier joueur qui parvient à entourer d'une chaîne une ou plusieurs cellules (vides ou occupées par l'adversaire).

Pour finir, j'ai préparé deux problèmes pour les lecteurs qui veulent poursuivre leur découverte du jeu d'Hex. Le premier est illustré sur la figure 2c; il provient de l'article original de Hein sur le jeu. Il consiste à trouver quelle case les rouges doivent jouer pour s'assurer la victoire. Si c'est trop facile, en voici un autre (voir la figure 2d): quel coup est gagnant pour les rouges?

Réactions

L'article du mois de mai de cette rubrique présentait une élégante surface à seulement un côté et une face, que Monsieur Josiah Manning, de la ville de Moscow, dans l'Idaho, et d'ailleurs je le félicite, vous en avez demandé et cette surface était topologiquement équivalente à celle d'un ruban de Möbius. André Gramain, de l'Université de Tours, a répondu que le problème est résolu dans son livre *Topology of Surfaces* (BCS Associates, Moscow, Idaho, 1984). Il explique que la surface présentée par Manning est topologiquement équivalente à une bouteille de Klein avec un trou. Pour sa part, un ruban de Möbius est équivalent à un plan projectif avec un trou. La bouteille de Klein et le ruban de Möbius n'étant pas équivalents, les deux surfaces sont topologiquement distinctes.





Des ondes dans les artères

ROLAND LEHOUCQ • JEAN-MICHEL COURTY

L'étude de la façon dont les ondes se propagent dans un tuyau souple révèle l'importance de l'élasticité artérielle.

Le sang est avant tout un liquide qui se déplace dans un tuyau, et le pouls un onde qui s'y propage. Pour schématiser ce point de vue de physiologie, il a l'intérêt de révéler les grandes contraintes que subit le système cardio-vasculaire. Les risques que signifie le vieillissement des artères deviennent alors plus clairs.

UN RÉSEAU COMPLEXE

Le système vasculaire d'un adulte est un réseau de tubes dans lesquels circulent environ cinq litres de sang. Envoyé dans les artères, le sang traverse les vaisseaux capillaires avant de revenir au cœur par les veines. Les capillaires irriguent les organes; ils sont donc fins et nombreux, d'un diamètre compris entre 5 et 10 micromètres. L'écoulement d'un liquide visqueux à travers des tubes aussi petits ne se fait pas sans résistance. Pour que le sang circule quand même, la pression à l'entrée des capillaires – la pression artérielle – doit

être supérieure à la pression à la sortie des capillaires – la pression veineuse.

C'est la pompe cardiaque qui assure cette différence. Le cycle qu'elle suit alterne des phases pendant lesquelles le débit sortant est nul (le cœur se gonfle) et des phases pendant lesquelles le débit est maximal (le cœur se contracte). Le liquide vital ne circule donc pas en continu : il est remis en mouvement à chaque pulsation, de sorte que la pression artérielle, elle aussi, suit des variations périodiques. Elle augmente lorsque le cœur se contracte et diminue quand il se gonfle.

Pour nous aider à étudier la circulation du sang, examinons au préalable une situation plus simple : la mise en mouvement d'un fluide au repos dans un tube rigide. Le contenu d'une canalisation domestique, par exemple, ne se met pas en mouvement instantanément. L'ouverture d'un robinet se ressent avec retard à une extrémité éloignée, parce qu'une onde de pression doit d'abord se propager. Tout comme le son, cette onde est

une onde de pression longitudinale, qui transmet de proche en proche les modifications de pression.

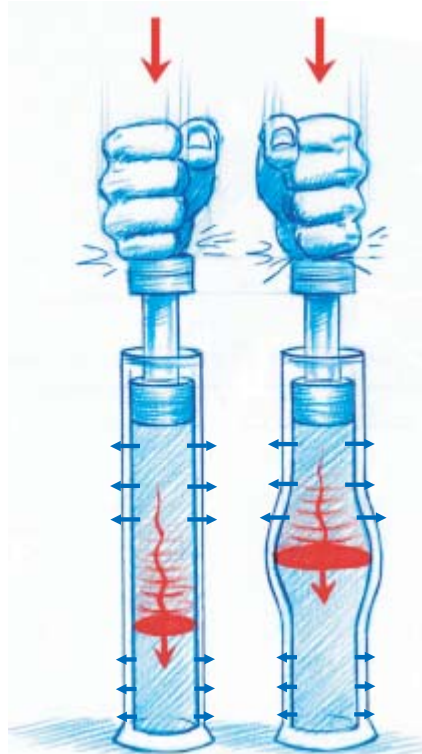
LE COUP DE BÉLIER

Un phénomène souvent observé met en évidence plusieurs des propriétés des ondes longitudinales de pression. Avez-vous déjà lutté contre la manette d'un vieux robinet grippé? La main veut lui imprimer un mouvement de rotation auquel elle résiste, avant de céder brusquement. Nous ressentons alors un choc dans le bras. Un bruit se fait entendre saccadé, comme si quelqu'un tapait au marteau quelque part sur la canalisation. Que s'est-il passé? Âgé, donc desséché, le joint en caoutchouc s'est raidi, de sorte qu'il se décolle d'un seul coup à l'ouverture du robinet. L'eau se met alors à couler et nous ressentons un choc : «le coup de bélier». L'écoulement soudain d'un liquide crée une dépression, laquelle se propage dans le réseau sous la forme d'une onde de choc, qui va jusqu'à un endroit où elle se réfléchit (coude, jonction entre tuyaux, etc.) Ces réflexions se font en cascade, c'est-à-dire que l'onde réfléchie revient au robinet, rencontre le joint, le recolte, ce qui provoque un nouveau choc, etc. Il en résulte un bruit répété. Dans certaines conditions, par exemple lorsque le robinet est entrouvert, sa fermeture engendre une nouvelle onde, dont l'existence se traduit par l'émission d'une succession de coups sourds ou d'un son grinçant. Toutes ces péripéties contrastent avec la facilité qui accompagne l'ouverture d'un robinet neuf. La souplesse du joint assure une variation de pression progressive, laquelle évite tout choc.

Lors de la propagation, la variation de pression due à l'onde est égale au produit de la vitesse de déplacement du fluide par la racine carrée du rapport entre la masse volumique et la compressibilité



Avez-vous déjà ouvert un robinet grippé? Vous forcez, puis brusquement il cède. Une bruyante onde de choc se propage alors dans la canalisation et dans votre bras : le coup de bélier.



Dans un fluide incompressible, une onde de pression se propage plus lentement dans un tube souple (à droite) que dans un tube rigide (à gauche). La surpression créée par l'onde est inférieure si les parois du tube sont souples. La nature a mis à profit cette propriété pour éviter les pressions artérielles élevées, nocives pour nos tissus, et fatigantes pour le muscle cardiaque.

du fluide. La masse volumique caractérise l'inertie du fluide, c'est-à-dire sa résistance à un changement de vitesse. Ainsi, plus le fluide est inerte et plus la pression nécessaire pour lui faire acquérir une vitesse donnée est grande. La compressibilité mesure la variation relative de volume du fluide en fonction de la pression à laquelle il est soumis. Plus elle est faible et plus le fluide est « rigide ». Rappelons que les corps les plus compressibles sont les gaz : si l'on part de la pression et de la température ambiante



Le pouls parvient au cou environ un dixième de seconde plus tôt qu'au poignet.

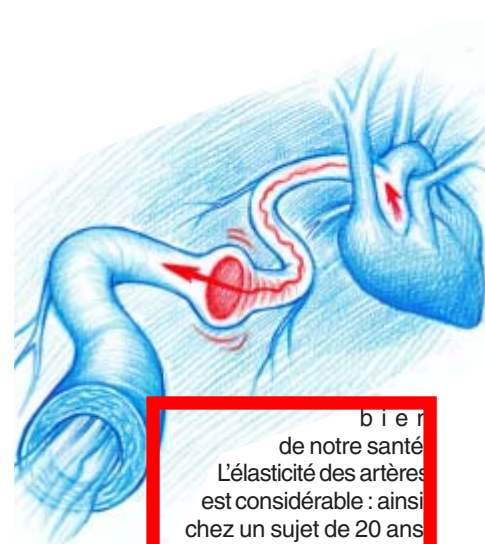
Le volume d'une masse d'air est divisé par deux si l'on double la pression. Les liquides, en revanche, sont très peu compressibles : l'eau l'est 15 000 fois moins que l'air !

Autre aspect important, la vitesse de propagation de l'onde de pression est égale à l'inverse de la racine carrée du produit de la masse volumique et de la compressibilité. Un fluide de faible masse volumique, donc peu inerte, ou faiblement compressible, donc très rigide, propagera rapidement les ondes. Dans l'air, la vitesse d'une onde de pression (celle du son) atteint 340 mètres par seconde ; elle est de près de 1 500 mètres par seconde dans l'eau. Ces valeurs sont relativement proches, ce qui surprend si l'on pense par exemple au facteur 15 000 qui sépare la compressibilité de l'eau de celle de l'air. Nous avons bien là l'illustration du fait que même si l'air est compressible comparé à l'eau, il est aussi 800 fois moins dense

DES TUYAUX SOUPLES

En quoi ces problèmes de robinets nous aident-ils à comprendre la circulation sanguine ? L'injection du sang dans les artères est tout à fait comparable à l'ouverture périodique d'un robinet d'alimentation qui reliait le réservoir sous pression qu'est le cœur au réseau de canalisations que sont les artères. À la sortie du cœur, la vitesse du sang dans l'artère aorte varie entre zéro et un mètre par seconde de 40 à 180 fois par minute, selon le pouls. Dans un tuyau rigide, il faudrait faire varier la pression d'injection d'environ une demi-atmosphère (0,5 bar) pour induire de telles variations de vitesse. Une telle valeur est bien au dessus de ce que peuvent supporter les tissus artériels, et ne pourrait être fournie par le cœur. Un problème que la nature a astucieusement contourné grâce à la souplesse des artères et à leurs diamètres variables.

Lorsque la pression augmente, en effet, la masse contenue dans une certaine longueur de tube rigide n'augmente que si le fluide se comprime. Dans un tube dont la paroi se déforme, la masse contenue dans la longueur augmente sans problème même si le fluide est incompressible. Aux extrémités d'un tube souple contenant un fluide peu compressible (le sang), tout se passe en fait comme si le même tube était rigide et contenait un liquide d'une certaine compressibilité. Laquelle ? Celle que devrait avoir le liquide qui courrait dans des artères supposées rigides serait de près de dix mille fois plus grande que celle du sang. Elle serait plus proche de celle de l'air que de celle de l'eau ! Les artères souples que préfère la nature permettent une pression sanguine cent fois plus faible qu'elle ne devrait être si nos artères étaient rigides. Pour le plus grand



bière
de notre santé
L'élasticité des artères
est considérable : ainsi
chez un sujet de 20 ans
les contractions cardiaques
augmentent de 50 pour cent
le volume de l'aorte

Qu'en est-il de la vitesse de propagation des ondes dans des artères souples ? Elle aussi, est réduite d'un facteur de cent de sorte que la vitesse du pouls est d'environ dix mètres par secondes. Pour le constater, prenez simultanément votre pouls au cœur et au cou, puis au cou et au poignet. Quasi immédiate au cou, l'arrivée du pouls au poignet est retardée par la distance à franchir (environ un mètre). Le délai qui sépare les deux pouls est d'environ un dixième de seconde.

Avec le temps, les artères se rigidifient, c'est l'artériosclérose. Ainsi, l'augmentation relative du volume aortique est souvent quatre fois plus faible chez un sujet de 60 ans, que chez un jeune adulte. La pression aortique augmente donc chez les personnes âgées, ce qui multiplie les risques de rupture d'une artère. Contraint d'assurer une pression plus élevée, le cœur fatigue plus. Un remède mécanique existe pour les cas extrêmes. Un chirurgien introduit un ballonnet rempli d'air dans l'aorte. Son rôle est de diminuer quand le volume occupé par le sang augmente et de gonfler quand il diminue, de sorte qu'au final la pression artérielle est maintenue sans surpression aortique. Cette technique exige toutefois une bonne surveillance. C'est pourquoi, le ballonnet est relié à un appareil externe, lequel contrôle ses variations de volume.

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au service d'astrophysique du CEA. Jean Michel COURTY est chargé de recherche au CNRS et travaille au laboratoire Kastler-Brossel (CNRS, ENS, UPMC).

Blood flow in arteries, Donald A. McDonald, (Edward Arnold, London 1960).
Waves in Fluids, James Lighthill, (Cambridge University Press, 1978).
http://www.fedecardio.com/votre_cœur/index.htm

Schiste et camisard

MAURICE MATTAUER

Dans un tableau, les guerres de religion du début du XVIII^e siècle se superposent à l'affrontement de deux plaques tectoniques

Le tableau *Les héros de la liberté de conscience* (voir page ci-contre), de Michel Leenhart (1853-1941), exposé au musée du Désert, à Mialet dans le Gard, évoque la lutte contre les camisards qui sévit, entre 1702 et 1710, dans le pays Cévenol. Le nom de camisard vient du mot languedocien *camiso* qui signifie chemise : une chemise blanche était le signe de reconnaissance des protestants durant leurs attaques nocturnes contre les soldats du roi. La scène représente un

pasteur prêchant devant une assemblée de protestants qui avaient l'habitude de se réunir secrètement dans les montagnes pour y pratiquer leur religion alors interdite. Les juifs chassés qui se retrouvaient dans le Désert. Cet épisode biblique a donné son nom à l'époque et au Musée. Si le tableau rappelle aux historiens un affrontement entre les protestants et les forces du roi Louis XIV – les célèbres dragons – après la révocation de l'Édit de Nantes, elles rappellent aussi, à ceux qui

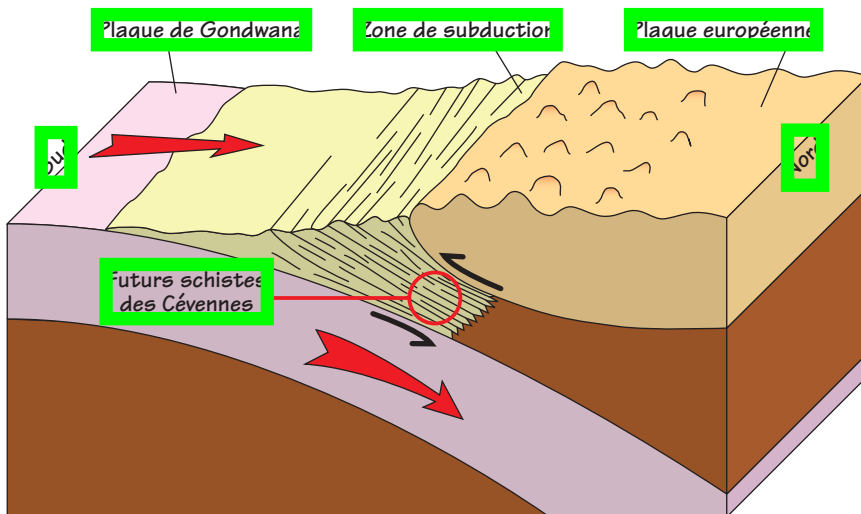
connaissent un peu les pierres et les paysages de la région, un événement de première grandeur, mais de toute autre nature puisqu'il est géologique et qu'il a eu lieu il y a environ 350 millions d'années.

Pour le mettre en évidence, regardons les blocs rocheux de la peinture, et en particulier celui sur lequel s'appuie le pasteur, et plus à droite, le bloc allongé sur lequel est assis un camisard coiffé d'un chapeau.

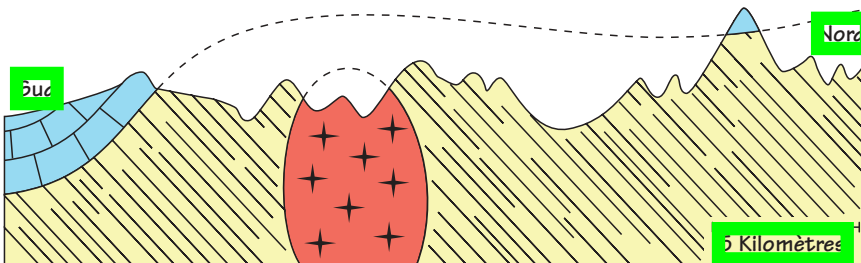
Un dicton régional dit que «le schiste est protestant, le calcaire est catholique» («schisme» n'est linguistiquement pas très loin de «schisme»). Ne nous étonnons donc pas que la roche ne soit pas massive comme un granite. Elle a plutôt un aspect et un débit feuilleté ; il s'agit de schistes tel qu'il s'en forme couramment lorsqu'une épaisse pile de sédiments marins, déposée sur la bordure d'un continent, est entraînée en profondeur dans ce que l'on nomme une zone de subduction, et s'enfonce sous un autre continent. Les sédiments, alors comprimés, sont fortement déformés. Suite à l'augmentation de température, ils recristallisent et changent d'aspect : on obtient des roches dites métamorphiques. L'intensité de ce métamorphisme varie selon la température : aux plus basses, les roches sont des ardoises, parfois exploitables, aux plus hautes, ce sont des micaschistes qui contiennent de fines paillettes de mica.

Dans les Cévennes, les sédiments, qui atteignaient plus de cinq kilomètres d'épaisseur, étaient constitués de particules argileuses fines sous forme de vase et de boue, en alternance avec des niveaux sableux. Lorsque la température atteint 300 à 400 degrés, vers dix kilomètres de profondeur, la roche acquiert une structure feuilletée, d'origine mécanique, que les géologues nomment schistosité.

En examinant les différents blocs, leur débit schisteux est évident, mais on remarque aussi que l'inclinaison de la schistosité varie d'un bloc à l'autre : les blocs ont donc été basculés. Dans le bloc allongé, à droite, sous le camisard au chapeau, l'inclinaison de la schistosité est faible (environ 30 degrés). En revanche, le pasteur s'appuie sur un bloc où la schistosité est presque verticale.



1. LA PLAQUE DE GONDWANA (en rose), en s'enfonçant sous la plaque européenne (en orange) dans une zone de subduction, a entraîné une pile de sédiments (en jaune) qui s'étaient déposés au fond de l'océan. Sous la pression des deux plaques et à la température qui règne en profondeur (300 à 400 °C), ces sédiments ont acquis une structure feuilletée et sont devenus des schistes qui formeront, après érosion, les Cévennes.



2. LES CEVENNES, dont la coupe est ici schématisée, s'étendent du Sud-Est du Massif Central jusqu'à la vallée du Rhône. Cette région est principalement composée de schistes (en jaune) formés à partir de dépôts marins, âgés de 400 à 550 millions d'années, qui ont été comprimés et érodés (l'ancienne limite est en pointillés). Un massif de granite (le massif de l'Aigoual), daté de 220 millions d'années (en rouge), coupe la schistosité : il a lui aussi été érodé (en pointillés). Les calcaires du Secondaire (en bleu) reposent en discordance sur les schistes des Cévennes.

En outre, on remarque de fines bandes blanches dans les schistes sombres. Il s'agit manifestement de filons de quartz blanc. Ce sont des quartz d'exsudation d'origine hydrothermale : lorsque les sédiments se déforment à des températures de 300 à 400 °C, ils se transforment sous l'effet de réactions chimiques qui libèrent de l'eau. Celle-ci contient en solution de nombreux éléments et spécialement de la silice issue des sédiments argileux et des niveaux de grès (des anciens sables) intercalés. L'eau circule dans la roche comprimée, en s'injectant dans les fissures, les plans de schistosité et toutes les zones de faiblesse.

Toutes ces déformations ont eu lieu dans la grande chaîne hercynienne qui forme le substratum de toute l'Europe et dont les Cévennes sont un exemple. À la fin de l'ère primaire (il y a 250 millions d'années), la chaîne Hercynienne a été érodée et aplanie, puis recouverte au cours de l'ère secondaire, de tranquilles dépôts de calcaires marins.

On sait aujourd'hui que les schistes des Cévennes sont nés dans un contexte

similaire à celui en vigueur, sous nos yeux dans l'Himalaya. Les schistes du Népal situés au pied de la haute chaîne montagneuse qui atteint plus de 8 000 mètres d'altitude, sont proches de ceux des Cévennes. Ils résultent de l'enfoncement de la plaque indienne sous la plaque asiatique selon un mécanisme identique à celui qui s'est déroulé il y a 350 millions d'années en Europe.

Ce qui est actuellement la moitié Sud du Massif Central se trouvait à proximité du pôle Sud, et appartenait à un grand continent nommé Gondwana (futur Amérique du Sud, Australie, Antarctique, Afrique et Inde) qui était en grande partie couvert de glace. Un large océan séparait ce continent Sud des continents de l'hémisphère Nord. Le Gondwana s'est ensuite déplacé vers le Nord, sur des milliers de kilomètres : la largeur de l'océan intermédiaire a alors diminué, suite à son enfoncement en profondeur, jusqu'à la collision des continents suivie de l'enfoncement du continent Sud sous le continent Nord. Trop souvent, les peintres représentent mal les pierres, et sou-

vent, ils déforment tellement la réalité qu'un géologue s'en aperçoit au premier coup d'œil. Toutefois, ici, les blocs rocheux sont peints avec réalisme et un luxe de détails significatifs, qui prouvent qu'ils n'ont pas été inventés. Je fais le pari que tous les détails géologiques de cette peinture n'ont pas été « inventés » mais qu'ils ont plutôt été « observés » quelque part, dans les Cévennes. Un connaisseur de la région muni de ces différents détails géologiques devrait être capable de retrouver le site précis où cette peinture a été effectuée.

A cet égard, la rédaction offrira un abonnement d'un an à *Pour la Science* aux lecteurs qui nous enverront une photographie du site où M. Leenhardt a peint *Les héros de la liberté de conscience*.

Maurice MATTAUER est professeur émérite de géologie à l'Université de Montpellier II.

M. MATTAUER, *Ce que disent les pierres* Belin-Pour la Science. 1998.



3. LES PROTESTANTS CEVENOLS, au début du XVIII^e siècle, se réfugiaient dans les montagnes pour y pratiquer leur religion à l'abri des soldats de Louis XIV. Les Cévennes résultent du plissement de couches de sédiments entre deux plaques continentales.

Histoire des techniques

Terre d'inventeurs

Alain Frerejean. Éditions Tallandier
2000 (355 pages, 130 francs)

Si «la grande histoire véritable est celle des inventions», comme l'a écrit Raymond Queneau, *Terre d'inventeurs* est un survol de notre histoire depuis 100 ans. Le livre présente, en dix chapitres, le portrait de treize inventeurs : certains bien connus, d'autres qui seront des découvertes pour beaucoup.

Denis Papin, le talentueux mais malheureux précurseur de la machine à vapeur et de la cocotte-minute, ouvre la marche. Il précède Claude Berthollet, un des très grands chimistes de la fin du XVIII^e siècle et du début du XIX^e, qui prépara notamment l'eau de Javel. Nicolas Conté inventa le crayon qui porte son nom et perfectionna l'usage des aérostats. Nicolas Appert trouva le moyen de conserver les aliments en bloquant les fermentations par la chaleur, et Louis Pasteur, plus tard, lui rendra hommage. Puis la photographie apparaît grâce au duo Nicéphore Niepce et Louis Daguerre.

Malgré le caractère hexagonal qui semble indiquer le titre du livre, deux étrangers y figurent. Le premier est le Américain Isaac Singer, qui sut faire une réussite commerciale de la machine à coudre inventée par Barthélemy Thimonnier. Le second est le baron Drais, dont la draisiennne, qui reste surtout connue des cruciverbistes, a été améliorée par le mécanicien Louis Michaux : ce dernier perfectionna la propulsion de l'engin en inventant les pédales fixées sur l'axe de la roue avant, ce qui conduira, après bien des améliorations, à la bicyclette.

Louis Lumière, aidé par son frère Auguste, a été le père du cinématographe, mais on ignore souvent que les deux frères déposèrent également plus de 200 brevets d'invention dans les domaines les plus variés de la chimie, de la physique, de la biologie et de la mécanique. Louis Renault, «le mécano de génie», a été le constructeur d'automobiles dont le nom a été pérennisé ; il a également joué un rôle considérable dans l'industrie militaire durant la Première Guerre mondiale.

Le dernier chapitre est consacré à Jean Mantelet, mort en 1991. L'évocation de ce personnage, dont le nom ne doit être connu que de quelques initiés, est judicieuse : en 1931, il invente le moulin à écumes – un million d'exemplaires ven-

us en un an –, puis toute une série de petits appareils ménagers mécaniques. À partir des années 1950, sous la marque Moulinex, il développe une gamme complète d'appareils électroménagers et se targuera – ce sera l'un des slogans publicitaires de la marque – d'avoir «libéré la femme».

La personnalité souvent captivante des inventeurs évoqués et les circonstances de leurs inventions sont bien présentées. On lit avec plaisir ce livre, bien écrit, et qui nous offre une fresque, partielle bien sûr, mais fort intéressante des inventions qui ont façonné notre vie quotidienne.

Pourtant... mes éloges doivent s'accompagner de quelques critiques. Ce livre pose le grave problème de la fiabilité des informations présentées. On a dit que «l'histoire est une belle fille que l'on peut violer à condition de lui faire un bel enfant». Le propos est amoral et machiste, mais ce qui est sûr, c'est que celui qui ne respecte pas l'histoire, la vraie, entre au mieux dans le domaine de l'histoire romancée. Je suis gêné que l'auteur de *Terre d'inventeurs* soit tombé dans ce genre – respectable – sans en être conscient ou, du moins, sans qu'il l'annonce à ses lecteurs.

Les historiens professionnels qui ont étudié le dossier sont maintenant d'accord pour affirmer que le mot célèbre «La République n'a pas besoin de savants» n'a pas été prononcé par le président du tribunal révolutionnaire qui condamna à mort Lavoisier et les autres fermiers généraux, contrairement à ce qui est écrit dans le livre. De toute façon, cette déclaration n'aurait pas pu être faite, comme l'écrit l'auteur, en réponse à l'abbé Haüy, lequel aurait témoigné à l'audience en faveur de Lavoisier : l'abbé Haüy a effectivement envoyé une pétition en faveur de Lavoisier, mais celle-ci fut antérieure au procès ; au cours de ce dernier, il n'y eut pas de témoins appelés à l'audience. Ainsi A. Frerejean cite un mot historique qui n'a pas été prononcé ; il existe des recueils de ces mots qui ne sont pas sans intérêt, au contraire : ils soulignent l'importance de l'événement qu'ils contiennent à pérenniser, en lui donnant ou en lui ajoutant un caractère mythique.

L'auteur a accompagné son livre d'une bibliographie, ce dont je suis heureux, mais il serait préférable que cette bibliographie corrobore les faits décrits et la manière dont ils sont rapportés. Par exemple, A. Frerejean décrit une entrevue très (mélodramatique) entre Berthollet et Robespierre intéressé – et étonné – par cet épisode. J'en ai recherché les sources dans la bibliographie. Deux ouvrages concernent directement Berthollet, ceux de Michelle Goupil et de Maurice Crosland. Le premier est muet sur cet épisode ; le second l'évoque mais sans lui donner, ni dans le fond ni dans la forme, le caractère théâtral qu'il a ici.

D'autre part, je regrette que l'auteur ait été un voile pudique sur des épisodes de la vie de quelques-uns de ces inventeurs : même s'ils ne sont pas en rapport direct avec leurs réalisations, ces événements font partie de leurs biographies. On lit ainsi que Louis Renault mourut le 24 octobre 1944 «dans des circonstances tragiques». Le lecteur à qui la vie et l'œuvre de Louis Renault ont été présentées en plus de 50 pages a le droit de savoir que les usines Renault ayant travaillé pour les Allemands pendant la guerre, Louis Renault a été inculpé de collaboration avec l'ennemi, à la Libération. Il mourut après un séjour en prison, et son entreprise fut nationalisée. Plus récemment, l'activité des frères Lumière durant l'Occupation a été mise en cause, au point qu'un projet de billet de banque à leurs effigies a été abandonné. Ces faits appartiennent à l'histoire de ces hommes, à notre histoire. On peut les discuter, mais rien ne sert de les occulter : les cadavres dans les placards finissent toujours par ressortir.

Georges BRAM

Physique

Généalogie de la matière

Michel Cassé. Édition Odile Jacob
2000 (276 pages, 160 francs)

Depuis un demi-siècle, l'astrophysique et la cosmologie tissent des liens de plus en plus étroits avec la physique des particules, dont les recherches tentent de décrire la nature et la structure de la matière. Les conditions physiques (densité, température...) étant extrêmes dans les étoiles et dans les phases primordiales de notre Univers, les observations astrophysiques et cosmologiques prolongent les études en accélérateurs de particules.

La paternité de cette idée revient probablement au physicien américain d'origine russe Georges Gamow, qui tira des conséquences essentielles de l'existence d'un Big Bang. D'une part, il prédit l'existence d'un rayonnement électromagnétique qui emplirait l'Univers (il calcula que l'énergie de ce rayonnement correspondrait à une température d'une dizaine de kelvins), et, d'autre part, il montra que les éléments chimiques pouvaient être synthétisés lors de réactions nucléaires par un mécanisme de «nucléosynthèse».

Le rayonnement électromagnétique fut détecté en 1965 par les physiciens américains Arno Penzias et Robert Wilson.

sa température est égale à 2,7 kelvins. Depuis son observation par le satellite COBE, de nombreux cosmologistes en étudient les propriétés ; ils ont déjà réussi à relier l'existence de grandes structures (amas de galaxies ou galaxies), dans l'Univers, à des phénomènes dont l'origine se trouve dans les théories des hautes énergies. On étudie aujourd'hui comment ces observations, et celles qui suivront, éclaireront le mécanisme à l'origine des structures observées dans l'Univers et dévoileront les conséquences des théories de supercordes et des nouvelles idées sur les structures de l'espace...

La nucléosynthèse fait l'objet du livre de Michel Cassé : des réactions nucléaires dans l'Univers et dans les étoiles forment les éléments, du deutérium (noyau à deux particules nucléaires, ou nucléons) jusqu'à l'uranium (noyau à 238 nucléons). Gamow avait compris que la nucléosynthèse primordiale engendra de l'hydrogène, de l'hélium et un peu de lithium. Puis, entre 1954 et 1957, Fred Hoyle, William Fowler, Margaret et Geoffrey Burbidge complètent qualitativement que des éléments chimiques compris entre le lithium et le fer se forment dans les étoiles (nucléosynthèse stellaire), et que des éléments compris entre le fer et l'uranium apparaissent lors des explosions d'étoiles, ou supernovae (ces découvertes valurent le prix Nobel à tous les physiciens cités, sauf à Fred Hoyle, dont les idées sur le Big Bang étaient jugées hérétiques). À ces deux mécanismes s'ajoute celui qui forme le lithium, le béryllium et le bore par interaction des rayonnements cosmiques avec les éléments déjà formés.

M. Cassé suit ces trois voies pour nous conter la genèse des éléments chimiques au fil de cycles de réactions nucléaires fortement imbriqués avec l'histoire de l'évolution stellaire. Un va-et-vient incessant entre l'astrophysique et la physique nucléaire au cours duquel nous sommes initiés à l'histoire du carbone et du fer, à l'alchimie stellaire de l'or et du plomb. L'exposé scientifique, bien documenté par de nombreux graphiques et tableaux, est saupoudré d'anecdotes historiques et dresse un tableau fidèle et rigoureux (mais pour quoi tant d'erreurs typographiques!) de l'état de l'astrophysique nucléaire.

La matière dont nous parle M. Cassé n'est qu'une part infime de la matière présente dans l'Univers. Elle a le bon goût d'être la matière constitutive des êtres vivants (du moins ceux que nous connaissons) et d'être visible. Comme le dit M. Cassé, dans une langue très imagée et haute en émerveillement : «les atomes des étoiles parlent aux atomes des yeux de langage de la lumière». Les observations cosmologiques indiquent que cette matière habituelle, «baryonique», n'est

que l'écume de la matière présente dans l'Univers. Plus des neuf dixièmes de la matière seraient invisibles (la célèbre «matière noire») et d'une nature nouvelle. Ces idées récentes de la cosmologie et leurs implications sont discutées brièvement dans le livre.

La quête commençante de cette matière invisible crée un lien supplémentaire entre astrophysique, cosmologie et physique des particules. Qui démasquera la matière noire : les télescopes ou les accélérateurs ? Plutôt qu'une course, il devrait y avoir des passages de relais. Les observations actuelles du fond diffus électromagnétique, des rayons cosmiques de très haute énergie, la recherche de matière noire... promettent de riches heures et de nombreux échanges entre les astrophysiciens, les cosmologistes et les physiciens des particules.

Le livre de M. Cassé nous rappelle que les interactions entre ces disciplines ne sont pas nouvelles. L'astrophysique nucléaire est une illustration riche en enseignements des fenêtres ouvertes entre l'observation de notre Univers et les théories censées décrire la structure de la matière à haute énergie.

Jean-Philippe UZAN

Économie

La théorie des jeux

Gaël Giraud. Éditions Flammarion, 2000 (318 pages, 59 francs).

Théorie des jeux et modélisation économique

David Kreps. Éditions Dunod, 2000 (188 pages, 170 francs).

La théorie des jeux est à la mode en sciences sociales, et son exemple fétiche est le «dilemme des prisonniers» : deux personnes soupçonnées d'avoir commis un crime se confrontent mutuellement – et sont sanctionnées – car chacune est alléchée par la promesse d'une prime (pour la toucher, il faut toutefois ne pas avoir été soi-même dénoncé), alors qu'elles gagneraient à se taire toutes deux (elles seraient libres mais ne toucheraient pas de prime). Cette étonnante mise en avant d'un dilemme conduit nécessairement à la question : qu'est-ce que la théorie des jeux ? Gaël Giraud, comme la plupart des théoriciens des jeux, répond : «C'est une branche des mathématiques appliquées.»

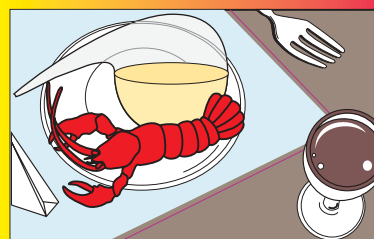
FRANCE INFO

POUR LA SCIENCE

Nous invitons à écouter la chronique de Marie-Odile Monchicourt :

Info Sciences

Tous les jours sur France Info à 15 heures 41, 17 heures 10, 20 heures 12, 22 heures 12, et 23 heures 42



Les prochains résultats présentés dans la rubrique Science et Gastronomie seront annoncés sur France Info le 25 janvier 2001



SCIENCE

1 rue Férou 75278 Paris Cedex 06

ABONNEMENTS : 01 55 42 84 04
COMMANDES : 01 55 42 84 04
DISTRIBUTION : 01 55 42 84 04

POUR LA SCIENCE Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Françoise Cinotti (Rédactrice en chef), Philippe Pajot, Loïc Mangin, Claire Le Poulennec, François Savatier, Emmanuel Leclerc, Laurence Plévert, Marie-Neige Cordonnier (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenot, Pascale Thioer, Céline Lapert, Sylvie Sobelman. Site Internet : Cyril Lamotte. Marketing et Publicité : Stéphane Monpouchet, assisté de Séverine Merviel et Christophe Vitiello. Direction financière : Anne Gusdorf. Direction du personnel : Jean-Benoît Boutry. Fabrication : Jérôme Malabert, assisté de Géraldine Le Coz. Presse et communication : Sylvie Gillet, assistée de Nathalie Choplain. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossolot. Conseiller scientifique : Hervé This.

Ont également collaboré à ce numéro : Paul Decaux, Évelyne Host-Platret, Marie-Thérèse Landousy, Anne Masé, Alexis Michel, Harold Mouras, Claude Olivier, Marie-Pierre Olphand, Christophe Pichon, Jean Schneider, Daniel Tacquenot, Dominique Valentian.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Hennie. Board of editors : Michelle Press, Mark Alpert, Carol Ezzell, Vayt Gibbs, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Ricki Rusting, Sarah Simpson, Gary Stix, Philip Yam, Glenn Zorpette. Chairman Emeritus : John Hanley. Chairman : Rolf Gruebach. President and Chief Executive Officer : Gretchen Teichgraber. Vice-President : Chuck McCullagh and Frances Newburg.

PUBLICITE France

Chef de Publicité : Jean-François Guillotin
jf.guillotin@pourlascience.fr, assisté d'Irène Limon
1 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97
Télécopieur : 01 43 25 18 29

Étranger : 415 Madison Avenue, New York.
N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS

Anne-Claire Ternois : 01 55 42 84 04

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Christophe Vitiello : 01 55 42 84 81

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE

POUR LA SCIENCE

Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.

Suisse : Servidis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes, 12 - Bogis

Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oides, 130 Bruxelles.

Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American» ou dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 1 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands Augustins - 75006 Paris).

Nos lecteurs trouveront des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 98A et 98B.

Voilà qui est bien vague, car à quoi servent les mathématiques sont-elles «appliquées»? Et à quelle fin? G. Giraud ne répond pas vraiment à ces questions. Tout au long de son ouvrage, il montre des situations variées, qui vont des privatisations des monopoles à la *pax romana* en passant par les grèves de 1936, où l'on voit divers «jeux» (les gains de chacun dépendant de la décision des autres), mais il se garde bien de les mettre sous une forme précise qui dirait à quoi servent les mathématiques. À le lire, on a le sentiment que la théorie des jeux ne traite pas des situations réelles, mais plutôt qu'elle examine des situations que la société considère comme «idéales» : l'auteur qualifie d'ailleurs souvent le théoricien des jeux d'«ingénieur social».

Cette dimension normative de la théorie des jeux est soulignée dès le début du premier chapitre : «La première question à laquelle la théorie des jeux s'efforce de répondre est la suivante : comment définir un «bien commun» à un groupe d'individus ayant des intérêts contradictoires?» La définition du bien commun est évidemment difficile : ce qui est le meilleur pour certains ne l'est généralement pas pour d'autres. Il n'existe donc pas, sauf cas très exceptionnel, de situation (d'issue du jeu) qui s'impose à tous comme «la» solution que le théoricien pourrait prescrire (en jouant son rôle d'«ingénieur social»). Ainsi la question que pose G. Giraud – définir un «bien commun» – n'a généralement pas de réponse.

Aussi les théoriciens des jeux adoptent-ils un point de vue plus limité, qui consiste à définir ce qu'ils appellent des «concepts de solution», ensembles de caractéristiques jugées raisonnables ou souhaitables (par exemple modélisateur ou les «joueurs»), tout en permettant le traitement mathématique. Le grand nombre et la diversité des concepts de solution est un des traits marquants de la théorie des jeux. G. Giraud en donne une longue liste : ensemble de marchandage, cœur, noyau, nucléolus, valeur de Shapley, équilibres de Nash, parfaits en sous-jeux séquentiels, corrélés... Cette liste peut conduire à l'idée d'une «richesse» de la théorie des jeux... mais aussi à un sentiment de désordre : pourquoi opterait-on pour tel concept de solution plutôt que pour tel autre? Et à quelle fin? On revient à la question initiale : que veut exactement la théorie des jeux?

Par exemple, au début du chapitre VII sur «la stabilité stratégique», G. Giraud écrit : «Nous savons que, si nous voulons être en mesure de prescrire aux joueurs d'un jeu non coopératif un comportement autoperformatif (*sic!*), alors le N-uplet de stratégies qu'il nous faudra retenir devra être un équilibre de Nash.» On retrouve l'idée que la théorie des jeux «prescrit»

Dans le cas présent, c'est un équilibre de Nash, en raison de ses «comportements autoperformatifs» – autrement dit, les prévisions sur la base desquelles les choix ont été faits sont vérifiées (ou confirmées). Pourquoi privilégier une telle situation? «Avoir vu juste» procure peut-être une certaine satisfaction, mais cela n'est sûrement pas une justification. G. Giraud a par ailleurs étudié le cas du dilemme des prisonniers et montré que, si celui-ci est répété un nombre fini de fois, le seul équilibre de Nash («autoperformatif») procure des gains nuls ou négatifs aux joueurs, alors qu'ils pourraient être très élevés – si le jeu est répété un grand nombre de fois – avec un autre type de comportement. «Prescrire» un équilibre aussi peu intéressant est donc une absurdité.

Emporté par son enthousiasme, G. Giraud écrit même qu'en adoptant le cadre de la théorie des jeux «les économistes se contentent souvent d'une représentation simplifiée du monde qu'ils étudient avec l'espoir qu'une formalisation plus réaliste les conduirait à des conclusions qui ne diffèrent pas qualitativement de celles auxquelles ils peuvent parvenir à moindres frais. Les physiciens qui font de la mécanique classique n'agissent pas autrement : ils n'ignorent certes pas que les phénomènes qu'ils étudient relèvent fondamentalement de la mécanique relativiste, mais en présence de vitesses faibles comparées à la célérité de la lumière, troquer les équations d'Einstein contre celles de Newton apporterait un gain de précision ridicule comparé à la perte de temps et d'énergie qu'occasionnerait un tel souci de réalisme». La théorie économique, grâce notamment à la théorie des jeux, aurait donc atteint la précision de la mécanique newtonienne? Voilà qui étonnera quiconque a côtoyé les prévisions économiques...

Si l'on veut se faire une idée sérieuse de la théorie des jeux, mieux vaut se reporter à une valeur sûre, l'ouvrage de David Kreps, *Théorie des jeux et modélisation économique*, récemment traduit en français (aux éditions Dunod). Mondialement reconnu, D. Kreps est bien moins ambigu que G. Giraud : loin de laisser entendre que la théorie des jeux pourrait expliquer la plupart des faits économiques et sociaux passés et présents, il se contente de considérer ses réflexions – très nuancées et proches du scepticisme – à son propos tout en la présentant de façon claire et accessible au non-initié.

Bernard GUERBIE

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>