



Pour la Science

■ POUR LA

SCIENCE

Mai 2000

édition française de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

www.pourlascience.com

*Les fourmis
sont des modèles
pour les robots*

**L'intelligence
collective**



BLOC-NOTES

5

de Didier Nordon



JEU-CONCOURS

6

Propriétés inévitables

par Pierre Tougne

TRIBUNE DES LECTEURS

7



POINT DE VUE

8

Big brother et IRM

par Yves Burnod



PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

10

Le statut de l'animal : ni homme ni objet

par Georges Chapouthier

SCIENCE ET GASTRONOMIE

14

Les quenelles

par Hervé This



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

16

- Peintures pariétales à Bornéo ■ Diabète sucré
- Tempête à zéro degré ■ Nucléosynthèse légère

- Détection gamma sensible ■ L'art du mélange

- Les neuropuces



VISIONS MATHÉMATIQUES

100

Le troupeau du soleil

par Ian Stewart

LOGIQUE ET CALCUL

102

Des nombres à la lettre...

par Jean-Paul Delahaye

IDÉES DE PHYSIQUE

108

De la lumière plein les yeux

par Roland Lehoucq et Hervé Dzitko



ANALYSES DE LIVRES

110

- Des causes et des signes des maladies aiguës et chroniques, édité et commenté par Mirko Grmek

- Les maladies dans l'art antique, de M. Grmek et D. Gourevitch
- Histoire de la pensée médicale en Occident, sous la direction de Mirko Grmek

- Détergents et produits de soins corporels, de Louis Ho Tan Tai
- Le monde des tourbières et des marais, sous la direction d'Olivier Manneville

d'Olivier Manneville

- Le principe de précaution. Rapport au Premier ministre,

de Philippe Kourilsky et Geneviève Viney

- Tout ce que vous vouliez savoir sur la génétique, de M. Brookes

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 cédérom Infonie collé en page 35.



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

Pourquoi aller sur Mars

26

par Glenn Zorpette

L'objectif principal des missions sur Mars est la recherche de la vie. Cet objectif justifie-t-il l'envoi d'astronautes?

Comment aller sur Mars

30

par George Musser et Mark Alpert

Les solutions techniques pour aller sur Mars sont nombreuses. La difficulté sera de choisir la meilleure.

Un direct pour Mars

38

par Robert Zubrin

Comment réduire les coûts de l'envoi d'astronautes sur la planète rouge.

Mars via ses lunes

42

par Fred Singer

Phobos et Deimos, satellites de Mars, pourraient être des bases intermédiaires à partir desquelles on explorerait la planète rouge.

Un autobus entre les planètes

44

par James Oberg et Buzz Aldrin

Grâce aux techniques d'assistance gravitationnelle, les coûts des trajets entre la Terre et Mars seraient considérablement réduits.

Un moral jusqu'au ciel

48

par Sarah Simpson

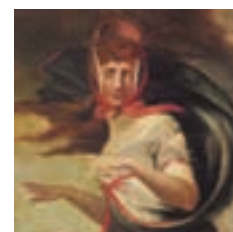
Suffit-il d'avoir l'«éttoffe des héros» pour garder le moral durant les longs voyages interplanétaires?

La biologie des phobies

50

par Arne Öhman

Les réactions de peur, telles l'accélération du rythme cardiaque, l'augmentation de la tension artérielle ou l'immobilisation, sont activées par divers stimulus, avant même que ceux-ci ne soient consciemment identifiés.



Expansion et recul des forêts équatoriales

58

par Dominique Schwartz

L'homme est-il un prédateur des forêts? Une reconstitution de la progression et du recul des forêts et des savanes équatoriales a nuancé cette accusation.

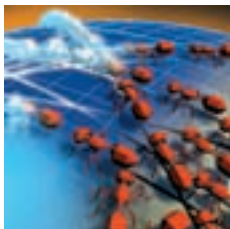


L'intelligence en essaim

66

par Éric Bonabeau
et Guy Théraulaz

S'inspirant des fourmis et des insectes sociaux, des informaticiens ont créé des «agents» qui coopèrent pour résoudre des problèmes complexes.



L'énergie négative

74

par Lawrence Ford
et Thomas Roman

On voyagerait à des vitesses supérieures à celle de la lumière si l'on maîtrisait une forme d'énergie inédite, «négative».



L'horloge biologique

82

par Michael Young

Des horloges internes commandent le métabolisme et les comportements des êtres vivants. On découvre qu'elles fonctionnent de manière analogue chez la mouche, chez la souris et chez l'homme.



Le stockage des gaz à effet de serre

88

par H. Herzog, B. Eliasson
et O. Kaarstad

Pour éviter le réchauffement de la planète, on envisage d'injecter du dioxyde de carbone dans le sol ou dans les océans.



La conquête de Mars

Le 5 juin 1927, neuf jeunes Allemands se réunissent à Breslau pour fonder une société de voyages dans l'espace (*Verien für Raumschiffahrt*). Parmi ces scientifiques romantiques, Wernher von Braun, figure emblématique de l'ingénieur habile qui ne s'embarrassait pas de scrupules idéologiques, avait compris la fascination que l'espace allait exercer sur les responsables politiques. Le dossier de ce numéro traite des différents aspects d'un futur voyage vers Mars (pages 26 à 49).

Les raisons naïves, invoquées par le passé pour légitimer les investissements spatiaux, apparaissent irréalistes. Qui veut aujourd'hui transformer l'espace en un dépotoir où nous évacuerions nos déchets? Qui croit que nous pourrions utiliser les ressources minières des autres planètes? Qui a l'audace de penser que nous pourrions coloniser l'espace pour y vivre? Ce fol espoir, que nous n'osons pas refouler, reste, hélas, hors de portée, car nous n'avons pas su diminuer le coût d'exportation des matériaux hors de la gravité terrestre. Toutefois, les politiques tirent profit de ce rêve pour légitimer leurs fracassantes promesses et déclarations.

Certains prétendent justifier les programmes spatiaux par leurs retombées technologiques dans l'industrie. Cet espoir n'a pas été confirmé : les révolutions technologiques récentes ne sont pas issues des recherches spatiales, à l'exception des satellites de télécommunication.

L'intérêt principal est scientifique, et il est parfaitement justifié. Les progrès des méthodes d'analyse géologique et biologique autorisent une meilleure recherche de la vie sur Mars : si une sorte de vie, à l'organisation encore inconnue, existe, nous avons de bonnes chances de l'identifier. Cette découverte aurait un retentissement intellectuel et des répercussions biologiques incontestables.

Ce qui stimule les scientifiques n'est pas l'utilisation technique de leurs découvertes, mais le prestige que ces utilisations confèrent à leur discipline. Les chercheurs ne s'intéressent aux applications de leur science que dans la mesure où elles servent leur quête de savoir. Les politiques prônent la conquête spatiale, car ils ont le sentiment de faire l'Histoire (les raisons militaires sont moins importantes aujourd'hui).

Et la curiosité, nourrie par un imaginaire ancien, est le moteur de l'intérêt du public. Le consensus sur le spatial est général.

Philippe BOULANGER



BLOC-NOTES

DIDIER NORDON

Boniments, capitale sucre

« Si le sel perd sa force, avec quoi le salera-t-on? » demande la Bible. Cette interrogation en appelle d'autres, aussi naturelles, dont j'ignore pourquoi on ne les examine jamais : continuera-t-on à en mettre dans les aliments? Le cas échéant, comment saura-t-on qu'on en a mis trop?

Face au sucre, le vertige métaphysique est moindre. Car là, on a des réponses. La revue *Sucre info* (n° 23, décembre 1999) écrit en effet : « Même dépourvu de saveur sucrée, le sucre resterait un ingrédient de base en industrie alimentaire. » Présenter de façon aussi carrée la conclusion d'une expérience irréalisable pourra paraître péremptoire, mais le fait est que le sucre joue un rôle dans les réactions chimiques de Maillard, qui régissent les processus de cuisson. Et puis, *Sucre info* est sponsorisée par les commerçants en sucre...

Tout de même, tout de même... La revue ne manifeste-t-elle pas une confiance excessive en la nécessité du sucre? Si elle n'était pas rouge, ma voiture serait encore une voiture. Mais si le sucre était « dépourvu de saveur sucrée », achèterait-on des gâteaux? Ne poussons pas le nominalisme jusqu'à croire qu'il suffit de s'appeler sucre pour éveiller une saveur agréable dans la bouche. En outre, s'il perdait son goût, qui sait si les réactions de Maillard accepteraient encore de se produire? Alors, vive le sucre sucré!



Que signifie « insignifiant »?

Le mathématicien René Thom est l'auteur d'une célèbre formule - « Tout ce qui est rigoureux est insignifiant » - qu'on interprète en général ainsi : pour faire progresser vraiment une science, mieux vaut l'audace et l'imagination, fussent-elles insuffisamment étayées ; un chercheur trop attaché à la rigueur fera faire à sa science des progrès insignifiants.

Dans un livre récent d'Ivar Ekeland, *Le meilleur des mondes possibles*, cette interprétation est remise en question. Le livre a pour but de confronter la conception de Leibniz selon laquelle ce monde est le meilleur possible avec

les résultats les plus récents des sciences. Ivar Ekeland est amené à constater, entre autres, que les sciences modernes n'ont rien changé au vertige de l'homme devant le monde. Il en conclut (page 135) que, dans leur rigueur, elles n'ont aucune signification métaphysique d'aucune sorte : ce qui est rigoureux est insignifiant.

D'une lecture à l'autre, le mot « insignifiant » change nettement de sens, et l'interprétation d'Ivar Ekeland apporte une nuance non négligeable à la première. Ainsi, susceptible d'inspirer des interprétations multiples, la formule de René Thom, quoique exprimée avec toute la rigueur sèche d'un énoncé mathématique, est loin d'être insignifiante.

La paresse efficace

Se déclarer chercheur scientifique peut paraître outrecuidant. Cela ne revient-il pas à déclarer qu'on fait le même métier qu'Einstein, Gauss, Poincaré et quelques autres du même calibre? Par trop intimidés par ce voisinage, beaucoup de scientifiques préfèrent se vivre comme de simples tâcherons, voués à accumuler de petits travaux. Et, disent-ils, ces petits travaux permettront aux rares grands génies de disposer d'un matériau auquel ils sauront donner sens.

Voilà une belle théorie, mais ne pourrait-on pas envisager l'hypothèse inverse? À savoir : l'accumulation de travaux mineurs contrarie les découvertes importantes. Plus les génies ont de petits travaux à lire et à digérer, plus ils sont emmenés vers des chemins de traverse. Ces travaux médiocres s'interposent entre eux et la vaste vision du monde qu'ils tentent d'élaborer, la dissimulent. Loin d'aider à y voir plus clair, ils obscurcissent le paysage.

Quand on n'est pas génial, paresse est peut-être la meilleure contribution qu'on puisse apporter à la science.



Le paradoxe du comédien

Si les considérations psychologiques interfèrent avec la logique, la collection des phrases autocontradictaires s'élargit merveilleusement. Voici des exemples.

Un interviewé déclare : « Je suis modeste » ou : « Il faut rester modeste. » La proclamation indique qu'il est prétentieux. S'il était modeste, ses interlocuteurs s'en rendraient compte. Dire : « Je suis modeste », c'est prouver qu'on ne l'est pas.



Second exemple. Face à un péril, certains essaient de se rassurer en disant : « Le pire n'est pas toujours sûr. » Or l'incertitude est le pire des maux! Elle est pire que la survenue du malheur redouté, laquelle nous soulage car nous passons alors de la crainte à l'espoir.

Troisième exemple. Quelqu'un dit : « Je suis peu sûr de moi. » Voilà la preuve que cette personne est sûre d'elle. Car elle ose avouer ce que beaucoup considèrent comme une faiblesse personnelle et tentent de cacher.

Il y a aussi le « paradoxe du sincère ». Un homme qui jure ses grands dieux que ce qu'il dit est vrai est bien souvent en train de mentir et d'essayer de faire passer son bobard en répétant sur tous les tons que ce n'en est pas un.

Tant et tant d'exemples? En psychologie, toute affirmation semble autocontradictoire.

La part du rêve

Modéliser? Fort bien. Malheureusement, la réalité déborde toujours du modèle.

Même le modèle du Loto échoue dans ses prédictions. Pourtant, le Loto n'est qu'une mise en œuvre à l'échelle nationale de la théorie des probabilités. Le jeu est arrangé pour que l'espérance de gain des joueurs soit négative. Comme les gens n'aiment pas perdre leur argent, le modèle prédit qu'ils ne joueront pas. Or les gens jouent. Notre modèle coïncide avec la réalité et il est erroné : deux conclusions sont possibles.

Première conclusion. La réalité est erronée. L'erreur gît en ces gens qui jouent, alors qu'on ne doit pas jouer à un jeu dont on ignore les lois.

Deuxième conclusion. Connaîtraient-ils les probabilités, les gens joueraient quand même, et notre modèle laisse échapper l'essentiel : le rêve. Acheter, pour quelques heures, une apparence de vraisemblance au rêve : « Si j'étais riche... », mérite qu'on dépense de l'argent! Un modèle convenable doit donc inclure le rêve dans ses paramètres. Les économistes savent-ils bien évaluer le prix de cette denrée?

Ce magazine
vous intéresse !



Vous y trouverez :

- ☐ Sciences-actualités
- ☐ L'actualité en astronomie
- ☐ Les actualités biomédicales
- ☐ Nouvelles de l'environnement
- ☐ Le texte intégral des conférences du samedi
- ☐ Le commentaire des expositions permanentes et temporaires
- ☐ Le programme des activités du Palais de la découverte

Je souscris un abonnement à la

REVUE DU PALAIS DE LA
DÉCOUVERTE

Je joins mon règlement par chèque
à l'ordre du

PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
(CCP 9065 48 J PARIS)

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

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

à retourner avec votre règlement à
Revue du PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
Av. Franklin-D.-Roosevelt - 75008 Paris.
Tél. : 01 40 74 80 0

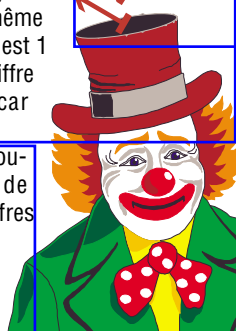
JEU-CONCOURS N° 71

PIERRE TOUGNE

Puzzle mathématique

Considérez le nombre 14 026 375, il a la propriété curieuse suivante : a) tous ses chiffres sont différents ; b) chaque chiffre est le chiffre des unités de son prédécesseur multiplié par deux auquel on ajoute soit 0, soit 1, soit 2 (le prédécesseur du premier chiffre étant le dernier chiffre du nombre). Par exemple, 4 est suivi de 0, car $2 \times 4 + 2 = 10$, de même le successeur de 5 est 1 (donc le premier chiffre du nombre), car $2 \times 5 + 1 = 11$, etc.

Sauriez-vous trouver le nombre de dix chiffres ayant cette propriété et parmi ceux-ci le plus petit et le plus



grand (on inclura les nombres ayant un 0 non significatif). J'ai intitulé ce jeu puzzle, car il n'existe pas de formules donnant ces nombres et qu'il faut passer par une recherche par essai-erreur, mais quelques considérations mathématiques simples permettent de limiter grandement ces essais. Certes avec les ordinateurs personnels actuels, le test des $10! = 3\,628\,800$ nombres possibles prendra moins de temps que l'écriture du programme, mais pour des nombres de plus de dix chiffres (naturellement en base supérieure à 10)?

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

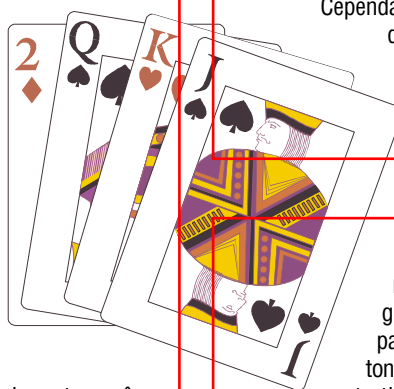
RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 69

Il y avait bien des méthodes pour résoudre le problème de l'organisateur, notamment en regroupant les joueurs quatre par quatre (ce qui est possible pour 100 joueurs, mais si le nombre de joueurs n'est pas un multiple de quatre, il faut une discussion supplémentaire) ou trois par trois. Cependant, la méthode suivante me semble la plus simple, car elle ne fait pas intervenir le nombre de joueurs à appairer au départ dès lors que celui-ci est pair et supérieur à quatre. L'organisateur prend trois joueurs au hasard avec lesquels il forme une paire jouant un même système d'enchère, ce qui est toujours possible selon l'hypothèse b. Avec le joueur restant, il en prend deux autres pour former une nouvelle paire et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il ne lui reste que trois joueurs à associer avec le joueur restant.

Désignons par A, B, C, D ces quatre joueurs, parmi A, B, C, il y en aura au moins un qui comprendra les deux autres (A par exemple). Parmi B, C, D, on est certain que D com-

prend au moins B ou C, supposons que c'est B. Alors A et C, B et D seront les deux dernières paires formées.

Comme me l'ont fait remarquer plusieurs lecteurs, l'hypothèse a n'est pas nécessaire. Cependant si un joueur ne connaît qu'un système d'enchère, l'hypothèse b implique qu'au moins $n - 2$ autres joueurs connaissent son système.



Erratum concernant le jeu concours n° 67. Le record à battre n'est pas de 24, mais de 23 graduations (record égalé par un lecteur, M. P. Pétauton). D'autre part, ma démonstration que cinq graduations sont insuffisantes pour obtenir les 20 angles de 18 degrés est incomplète, car 0 et 360 degrés étant le même angle, il ne nous faut que 19 différences qui sont potentiellement possibles avec cinq graduations. Le nombre d'angles à mesurer étant neuf angles «pairs» et dix angles «impairs», une petite étude exhaustive selon le nombre de graduations paires et impaires montre que c'est impossible à réaliser avec seulement cinq graduations.

TRIBUNE DES LECTEURS

Détournement de thèse

Depuis quelques années, chacun y va de ses propositions pleines de compassion pour «sauver» ces pauvres Bac+8, 9 ou 10 qui s'entassent dans les laboratoires.

Dans son «point de vue», Nicolas Chevassus-au-Louis (voir *Pour la Science*, janvier 2000) vise à transformer le thésard en étudiant coupable de «rêver» un avenir pour lequel il est formé. Il complète le «point de vue» de Bernard Beauzamy (voir *Pour la Science*, juin 1999), qui fait le «constat cruel» que le doctorant est un tâcheron inefficace en entreprise, et lui recommande de proposer à son employeur un salaire réduit!

Nos deux auteurs n'analysent pas le discours dominant selon lequel s'il n'y a que peu de possibilités de devenir chercheur ou enseignant, il faut se responsabiliser en s'adaptant au monde merveilleux de l'entreprise!

On parle métaphoriquement de «globe-trotters» ou de «formidable capacité d'adaptation» pour désigner les galériens qui errent de post-docs en post-docs... Des métaphores qui évitent de désigner la précarité par son vrai nom, et de réfléchir sur un vrai statut de doctorant et à son avenir.

Il est en effet plus facile de vanter les mérites du recyclage et de l'entreprise que de revendiquer le plein emploi dans la recherche publique, car ce malaise imposé aux doctorants n'est qu'un des symptômes de sa lente agonie : aujourd'hui, la politique en vigueur s'emploie à brader le capital intellectuel public aux intérêts économiques privés. Du côté de l'enseignement, l'université jongle avec des contrats précaires, tandis que dans les organismes de recherche, le nombre de postes ne compense plus les départs à la retraite, et les post-docs se multiplient... On a vite oublié ce qu'était le contrat social à l'origine de la recherche publique : la légitimation et le financement public de la science en échange de la contribution de cette dernière à l'amélioration de la richesse (notamment culturelle) et de la sécurité collectives. Au total, ce sont 6 000 postes par an qui devraient être publiés, soit de quoi «caser» les deux tiers des nouveaux docteurs.

Jamais l'Université et la Recherche publique n'ont eu autant besoin de docteurs, mais jamais leur statut n'a été aussi détourné! L'université n'a pas à déboucher sur l'entreprise, et elle ne peut fonctionner correctement sur un réservoir de précaires. On aura beau obliger le doctorant à écouter les louanges de l'entreprise, il faudrait une foi de charbonnier pour le détourner d'une trajectoire naturelle et souhaitée.

F. LAUDET, Montpellier

J. S. STEYER et G. LECOINTRE, Paris

Retrouvez l'intégralité de cette lettre et les arguments des auteurs sur notre site Internet

Raciologie?

Est-il intrinsèquement mauvais de s'interroger sur l'origine et l'évolution des populations? On peut se poser la question en lisant l'article d'Agnès Lainé (voir *Pour la Science*, octobre 1999). Amalgame et confusion chronologique y accréditent la thèse suivant laquelle les anthropologues sont des ringards dangereux qui, dans leur «quête des origines» déclinent les humains «en races, sous-races et types». À ce point de vue, l'utilisation du présent de l'indicatif sous une image d'un autre siècle est pour le moins malencontreuse.

Non, l'objectif de l'anthropologie biologique n'est pas la classification de «races», pas plus que celui de la chimie n'est de trouver le secret de la pierre philosophale. Lorsqu'Agnès Lainé découvre que l'anthropologie est née chez des «puissances coloniales», sa démonstration est un peu courte. Pendant deux siècles, où donc ailleurs se sont développées mathématiques, physique nucléaire ou linguistique? Malheureusement le racisme et l'esclavagisme préexisterent de très loin à l'avènement des recherches anthropologiques.

Les nazis ont dévoyé l'histoire, l'archéologie, la génétique, la médecine et la linguistique. Cela condamne-t-il ces disciplines? Pour en venir à l'Afrique et à l'anthropologie, existe-t-il la moindre preuve, comme le suppose Agnès Lainé, que les génocidaires rwandais aient eu besoin des travaux de Jean Hiernaux pour justifier leurs massacres? Présenter ce chercheur comme un «héritier de la raciologie antérieure» qui y «adhérait pleinement» traduit une grave méconnaissance de l'histoire de la discipline. Jean Hiernaux, dans son enseignement comme dans ses nombreux ouvrages scientifiques, rappelait avec insistance l'absence de hiérarchie entre les peuples, l'innocuité des justifications scientifiques du racisme et l'importance d'étudier la diversité biologique de l'espèce humaine dans l'intérêt des populations elles-mêmes.

D'une façon plus large, l'article d'Agnès Lainé s'inscrit dans un mouvement très «politiquement correct» qui, au cours des dernières décennies, a jeté l'opprobre sur l'anthropologie biologique, notamment en France, alors même que la discipline a prospéré dans le monde anglo-saxon. Devons-nous réellement être fier de cette autre «exception française» qui fait de nous les grands absents des avancées les plus récentes sur l'origine de l'homme moderne et de sa diversité?

Pierre DARLU, INSERM, Unité 535
Jean-Jacques HUBLIN, CNRS, UPR 2147

Réponse de Agnès Lainé

Si être politiquement correct revient à adhérer à des valeurs antiracistes et humanistes, je suis sûre que Jean-Jacques Hublin et Pierre Darlu le sont autant que moi... Ces mots terribles comme «race», «raciologie» et leurs dérivés choqueraient-ils s'ils ne touchaient à un aspect du passé que nous avons peine à assumer, ce que montre l'effort, sensible dans leur réponse, de rejeter du côté des seuls nazis la vision raciale d'une histoire de l'humanité que, pourtant, tout l'Occident a partagée? La question se pose : pourquoi se sentir «accusé» de ce que d'autres ont pensé, en d'autres temps?

Je suis historienne : à l'époque coloniale, où étaient les historiens? En Afrique? Ils pensaient, à la suite de Hegel, que ces «peuplades» sans écriture n'entraient pas dans les champs de l'histoire... Les historiens ont changé, les anthropologues aussi.

Jean Hiernaux en est un exemple. Ce chercheur éminent dont beaucoup connaissent l'esprit tout autant «politiquement correct», était au Rwanda en 1950. Il a cru ce qu'on disait alors des différences de race et d'origine des Hutu et des Tutsi (pourquoi ne l'aurait-il pas cru?). Ses articles de 1952 à 1956 ne sont jamais cités : il y a alimenté de données physiques et sérologiques cette interprétation, avant de se rendre compte de l'erreur. Il a par la suite démenti «l'idéologie hamitique».

La vision naturaliste de l'Autre, dont j'ai retracé certaines incarnations scientifiques en Occident, a été (diversement) intégrée aux identités collectives actuelles des peuples ex-colonisés, parfois pour le pire. L'afrocentrisme en est une autre manifestation.

J'invite J.-J. Hublin et P. Darlu à élargir nos échanges sur ces sujets difficiles. Il est vrai que l'anthropologie physique est mal aimée des sciences humaines, mais les contestations ont été extrêmement vives, et plus longtemps, en Grande-Bretagne. Peut-être au contraire l'abcès n'a-t-il pas été assez crevé en France?

Je plaide pour le droit à l'exégèse des sciences quelles qu'elles soient et je suggère qu'il importe de ne pas laisser entièrement à d'autres le soin de cette tâche. Je suis, moi aussi, passionnée par les recherches sur l'évolution humaine ; souhaitons que cette «quête» se déroule dans le souci des hommes qui vivent aujourd'hui.

Ecrivez 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 d'autres contributions de lecteurs sur le site Web www.pouirlascience.com.



Big brother et IRM

YVES BURNOD

L'imagerie par résonance magnétique révèle-t-elle ce que nous pensons ?

L'imagerie cérébrale se perfectionne aujourd'hui très vite ; l'imagerie fonctionnelle par résonance magnétique et la magnétoencéphalographie montrent le cerveau humain en activité. L'être humain est-il devenu transparent ? Devons-nous craindre qu'autrui lise dans notre cerveau ? Sans attendre, réfléchissons à ce qui est licite et à ce qui est abusif, tant dans l'emploi de l'imagerie que dans l'interprétation des résultats.

Certains redoutent que les nouvelles méthodes d'imagerie ne deviennent des machines à détecter le mensonge ou à lire dans l'inconscient. La justice aimerait déterminer à coup sûr la culpabilité ou l'innocence des suspects. Les industriels voudraient savoir si les consommateurs apprécient leurs produits...

Disons d'emblée que l'imagerie cérébrale montre l'activation des différentes parties du cerveau, mais ne permet rien de lire dans l'esprit d'un individu. On doit surtout craindre les interprétations erronées des images d'activation cérébrale, qui risqueraient d'entraîner à leur tour des utilisations dangereuses. De même que l'on a abusivement attribué des gènes à des types de comportements (ont été ainsi annoncés des gènes de la fidélité, de l'homosexualité, de l'intelligence...), certains pourraient prétendre avoir identifié une région cérébrale avec un comportement, une faculté, ou un trait de caractère particulier (la région de la l'intelligence par exemple). Vers 1810, le médecin allemand Franz Josef Gall avait fondé la phrénologie, soutenant que la forme du crâne révélait l'état des diverses facultés d'un individu ; une forme modernisée de ce type de classification risque d'apparaître.

Pourtant, l'imagerie fonctionnelle est un outil remarquable pour mieux comprendre les circuits cérébraux qui sont à la base des fonctions sensorielles, motrices ou cognitives. Pour ces recherches, on fait passer des tests comportementaux à des sujets volontaires, et on compare les différences d'activation cérébrales quand on ne fait varier – c'est en tout cas ce que l'on désire – qu'un seul paramètre. On cherche alors des corrélations entre l'activation de zones précises du cerveau et ce paramètre. Par exemple, on compare l'activation céré-

brale pour des images de visage et pour d'autres stimuli qui ont les mêmes composantes visuelles élémentaires, mais ne sont pas des visages. On peut penser que les zones plus activées révèlent les circuits cérébraux qui participent à la reconnaissance des visages. Toutefois un nombre considérable de paramètres n'auront pas été testés et risquent d'activer ces mêmes zones. À une même carte d'activité cérébrale correspondent parfois de nombreux traitements sensoriels, moteurs ou cognitifs.

Tout l'art des spécialistes de l'imagerie cérébrale consiste à croiser les résultats d'expériences variées, afin d'obtenir une interprétation fiable. Quand l'imagerie fonctionnelle est apparue, les abus d'interprétation néo-phrénologiques n'ont pas tardé, mais, à mesure que les résultats se sont accumulés, on a compris que chaque région participait à de nombreuses fonctions. Par exemple, une même zone du cerveau peut participer à la commande d'un mouvement, à la vision du même mouvement effectué par une autre personne, à l'image mentale de ce mouvement, à des mémorisations, à des représentations mentales et à des traitements cognitifs plus ou moins associés, etc.

D'autre part, on a découvert que les analyses sont compliquées par la résolution des appareils actuels : quelques millimètres. Au mieux, on voit des populations de plusieurs centaines de milliers de neurones. Or la finesse des traitements cérébraux est bien supérieure, et des neurones très proches ont des fonctions différentes, certains neurones étant activateurs, d'autres inhibiteurs. Comme on est loin de distinguer les circuits activateurs et inhibiteurs par l'imagerie fonctionnelle, on risque d'obtenir la même image quand les sujets pensent une chose et son contraire ! L'imagerie fonctionnelle ne montre que la somme des activations neuronales, laquelle peut être obtenue de mille façons différentes.

Troisièmement l'activation de zones cérébrales n'est pas nécessairement un signe de la mise en œuvre d'une capacité : plus les sujets apprennent une tâche, plus l'activation de leur cortex frontal diminue. Le cerveau s'adapte ; les sujets font moins d'effort quand ils savent

résoudre un problème que quand ils le découvrent pour la première fois.

Enfin on découvre chaque jour de nouvelles propriétés de l'organisation des régions cérébrales qui traitent la perception, le mouvement, le langage, les émotions... Surtout, au delà de chaque région, on voit apparaître des réseaux d'aires cérébrales activées. Tous les individus activent la même chaîne de traitement, même si les zones intermédiaires activées ne sont pas identiques, tant la variation interindividuelle est forte.

La courte histoire de l'imagerie la rend encore très vulnérable aux erreurs d'interprétation. La découverte d'une aire cérébrale de la tristesse ou de la fidélité ne résisterait sans doute pas à des vérifications correctement effectuées : au prix d'une accumulation des résultats, on comprendra de mieux en mieux la logique neuronale de l'activation des diverses zones cérébrales. En revanche, on ne parviendra pas à savoir à quoi un sujet pense, à un instant donné. Si l'on est honnête, on ne peut envisager d'utiliser l'imagerie dans un cadre judiciaire, pour identifier un coupable, en regardant son cerveau, par exemple, ni pour dépister des instincts pervers qui conduiraient à une présomption de culpabilité. Les scientifiques ont le devoir d'expliquer clairement aux partenaires industriels ou institutionnels ce qui est possible et ce qui ne l'est pas.

Les abus d'interprétation de l'imagerie cérébrale, qui pourraient conduire à des abus d'utilisation, ressemblent un peu à ceux que l'on observe déjà en génétique. En raison de la compétition scientifique, des chercheurs risquent de dire plus qu'ils n'observent. La science n'a pas d'autre garde fou que l'honnêteté scientifique. Nous n'éviterons probablement pas l'annonce prochaine de la découverte d'une région cérébrale «de l'intelligence» ou «de la morale», mais la vigilance de la communauté scientifique, épaulée par les revues scientifiques, limitera les effets obscurantistes d'une telle annonce.

Yves BURNOD dirige le Laboratoire INSERM «plasticité cérébrale et adaptation des fonctions visio-motrices».



Le statut de l'animal : ni homme ni objet

GEORGES CHAPOUTHIER

*L'Occident a mis près de 2 000 ans à admettre que l'animal n'est ni une sorte d'homme, tel le renard du **Roman**, ni un objet, comme le suggéra Descartes, mais une créature douée de sensibilité.*

De nombreuses espèces vivantes, animales ou végétales, peuplent la biosphère et la partagent avec l'espèce humaine. Le statut des animaux, notamment de ceux qui, par leur morphologie, semblent se rapprocher de l'homme, a soulevé diverses questions : comment doit-on traiter ces êtres familiers, compétiteurs, voire ennemis ? Les différentes civilisations ont apporté à ces questions des réponses variées. Nombre d'entre elles «anthropomorphisent» l'animal, le concevant comme une sorte d'homme modifié, ou même de dieu conçu à l'image de l'homme. De cette approche sont nées les chimères, mêlant l'homme à l'animal et pourvues des vertus attribuées à l'animal composant la chimère. On en trouve des exemples aussi bien parmi les dieux hindouistes que chez les dieux à têtes d'animaux de la mythologie égyptienne. Comment les différentes conceptions morales de l'animal, de l'animal humanisé à l'animal réduit à l'état d'objet, ont-elles évolué dans la civilisation occidentale ? La réponse à cette question est d'un intérêt primordial pour la pratique scientifique, dans la mesure où elle guide les différentes conceptions de l'expérimentation animale pratiquée aujourd'hui.

La pensée occidentale repose essentiellement sur la pensée grecque et sur la pensée juive. Ces deux courants de pensée prônent le respect de l'animal. Schématiquement, on peut dire que, chez les Grecs, deux traditions philosophiques cohabitent. Pour les tenants du courant «rationnel», dont Aristote est sans doute l'exemple le plus célèbre, seuls semblent compter l'intérêt de l'homme et la connaissance scientifique. Toutefois, ce penseur, père, à la fois, de la philosophie et de la biologie, n'a jamais émis la moindre remarque sur une éven-

tuelle prise en compte de la douleur des animaux ! D'autres philosophes anciens, tel Pythagore, ou tardifs, tel Plutarque, voire même quelques philosophes de l'époque classique, par exemple le successeur d'Aristote, Théophraste, ont développé des thèses très favorables à l'animal.

LE STATUT DE L'ANIMAL DANS L'ANTIQUITÉ

Certains de leurs arguments sont dépassés, pour la pensée occidentale d'aujourd'hui : par exemple, les philosophes grecs soutenaient que les sacrifices animaux ne plaisaient pas aux dieux ou que, par la métempsycose, l'animal était une sorte de réceptacle de l'âme d'un parent décédé ; en revanche, d'autres arguments sont remarquablement modernes, car ils soulignent la parenté morphologique, et même comportementale, des animaux et de l'homme. Dans un savoureux traité qui lui est attribué, Plutarque imagine une conversation entre Ulysse, la magicienne Circé et Gryllus, un compagnon d'Ulysse, que Circé a transformé

en porc (voir l'illustration en haut à gauche). Ulysse souhaite voir ce dernier retrouver sa forme humaine, et Circé propose d'interroger Gryllus pour connaître ses souhaits. Ce dernier affirme qu'il souhaite vivement rester un porc et décrit dans le détail toute une série de vertus animales qui suggèrent, selon lui, que les animaux sont meilleurs que les hommes !

Dans leur ensemble, tous ces arguments aboutissent à une conception anthropomorphique des animaux, d'autant que la communication animale est alors souvent prise pour un langage. Il n'en reste pas moins vrai que certains passages de ces auteurs anciens ont des accents qu'un auteur moderne ne nierait pas. Ici encore, les Grecs ont été les précurseurs de l'Occident. Si l'on oppose le courant rationnel et ce courant zoophile, on peut même affirmer qu'existe déjà, en germe, dans l'Antiquité, une opposition entre expérimentateurs et partisans de la protection des animaux, opposition qui ne réapparaîtra en Occident qu'au XIX^e siècle.

Dans la pensée juive, source de la pensée chrétienne, un grand nombre de préceptes visent au respect de l'animal : interdiction de la chasse d'agrément ; abattage rituel avec un couteau parfaitement aiguisé afin de causer le moins de douleur possible à l'animal ; repos hebdomadaire du sabbat pour l'animal de travail, notamment. Avant qu'il ne soit chassé du paradis terrestre, l'homme était conçu pour vivre en harmonie avec les animaux. Selon certains commentateurs modernes, le fondement de la relation entre l'homme et l'animal, dans le judaïsme, réside dans le commandement donné aux fils de Noé qui leur interdisait de consommer la viande avec



En Égypte antique, les animaux sont déifiés : le dieu singe Thot protège le scribe royal Nebmertouf.

son sang. L'interdit ne porterait pas tant sur le sang lui-même que sur le sang médiateur de la vie : aussi longtemps que le sang continue à circuler dans le corps, l'animal est vivant et doit être respecté ; lorsque le sang a cessé de circuler, le corps de l'animal devient semblable aux objets inertes et peut alors être utilisé. L'ensemble du discours distingue clairement l'animal de l'objet comestible.

La pensée européenne évolue au Moyen Âge vers des conceptions hétéroclites des rapports avec l'animal. Durant cette période, troublée par des guerres, des invasions, des épidémies, le respect de l'animal n'est pas un des principaux objets de préoccupation. Les esprits se réfugient dans un univers religieux ou mystique, qui adopte les dogmes aristotéliens. Dans cet univers centré sur Dieu, l'animal n'a guère de place et la pratique quotidienne le relègue au rang d'objet, même si un certain nombre de penseurs chrétiens ont plaidé pour un plus grand respect des animaux. Cependant, à côté de cette émergence d'un animal-objet cohabite une conception anthropomorphique, ainsi qu'en témoignent à la fois les fabliaux, comme le *Roman de Renart*, où les animaux sont humanisés, et les procès intentés à certains animaux. Ainsi, en 1314, un taureau est condamné à mort par un tribunal pour avoir tué un homme ; l'arrêt est confirmé par le parlement de Paris. Un peu plus tard, les rats dans leur ensemble furent défendus avec succès par l'avocat Chassanée contre une menace d'excommunication prononcée à leur endroit par l'évêque d'Autun ! Les exemples abondent : des ultimatums, des anathèmes ou des procès sont lancés par les autorités religieuses contre des insectes ou contre des sangsues.

À la Renaissance, le centre du discours quitte Dieu pour passer à l'homme. C'est la naissance d'un humanisme triomphant, mais le statut de l'animal n'en est guère amélioré. Notons cependant une exception chez Montaigne, qui prône le respect de l'animal en s'appuyant sur des arguments semblables à ceux des philosophes grecs. Montaigne, un Ancien au cœur de la Renaissance ?

Puis vient Descartes. En proposant le concept d'animal-machine, Descartes consacre sans équivoque l'assimilation de l'animal à un objet. Cette adoption a deux conséquences simultanées. Une conséquence favorable à la science : puisque l'animal (et le corps humain) sont des machines, on peut les analyser et en étudier le fonctionnement. Une conséquence très fâcheuse sur la morale : puisque l'animal est un automate, il ne ressent aucune douleur, et l'on ne doit pas se préoccuper de ce qu'il ressent. La pensée de Descartes est à l'origine d'un triomphe scientifique et d'un désastre

moral. Quelques siècles plus tard, les écrits de Claude Bernard – la charte de la biologie moderne – défendent la légitimité absolue de l'utilisation de l'animal comme un objet, qu'il faut disséquer vivant pour en comprendre le fonctionnement interne. La biologie moderne s'est construite sur ces bases cartésiennes.

L'ANIMAL-OBJET

La fin du XIX^e siècle marque le triomphe de cette conception de l'animal-objet. L'homme est le monarque absolu d'une nature conçue comme un simple « environnement » de l'espèce humaine. Cette conception est aussi liée au triomphe de l'Europe qui colonise le monde. Même si l'Occident a, depuis lors, nuancé son propos, nous sommes encore très influencés par cette vision du monde où l'homme s'est attribué tous les droits sur la nature. Notre système législatif et juridique napoléonien considère encore l'animal comme un bien meuble ou immeuble !

Si la conception de l'animal-objet s'est

peu à peu imposée en Occident, ce fut surtout parmi les penseurs et les philosophes. Même au temps de Descartes, certains êtres plus sensibles admettaient difficilement que l'animal soit « une machine ». Ainsi, Madame de Sévigné notait à propos des animaux : « Des machines qui aiment, des machines qui ont une élection pour quelqu'un, des machines qui sont jalouses, des machines qui craignent. Allez, allez, vous vous moquez de nous ; jamais Descartes n'a prétendu nous le faire croire ! »

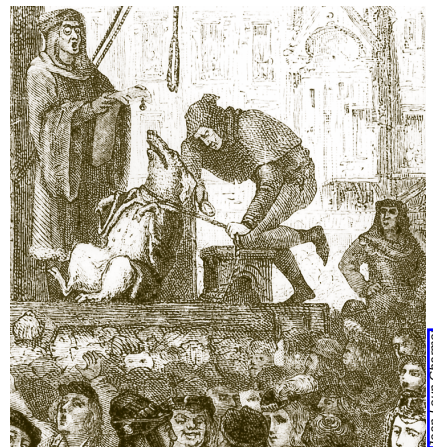
Ce « bon sens » a été conforté par les connaissances scientifiques. Les biologistes ont montré que, si l'animal était considéré comme une machine, cette machine fonctionnait d'une manière très proche de la « machine humaine » : la physiologie, la biochimie, le comportement des animaux dits supérieurs sont extrêmement proches de ceux de l'homme. Toutefois, si l'on a réussi à enseigner des rudiments de langage à des singes anthropoïdes, il reste à l'homme, dans l'état actuel des connaissances, deux spécificités : le lan-



En Inde, les dieux étaient souvent des chimères mêlant l'homme et l'animal. Ici Narsimha, la quatrième incarnation de Vishnou.



PIERO JESSE



JEAN LOUIS CHARTIER

Dans le *Roman de Renart* (à gauche), l'animal est humanisé, tout comme l'étaient certains animaux, jugés à l'égal de l'homme. Ainsi cette truie de Falaise, suppliciée par pendaison en public (à droite).

gage articulé et la pensée symbolique. Toutefois, cela ne paraît pas devoir justifier le traitement de l'animal comme un simple objet. Mieux encore, la théorie de l'évolution, étayée par des preuves paléontologiques, anatomiques, génétiques et moléculaires, montre que, non seulement l'animal ressemble à l'homme, mais qu'il est son ancêtre et son cousin !

L'ANIMAL, ÊTRE SENSIBLE

Toutes ces raisons, auxquelles s'ajoutent de possibles influences de philosophies d'Extrême-Orient, ont conduit à la conception de l'animal-être sensible. Cette conception, défendue par des philosophes comme Schopenhauer ou Bentham, a connu un succès notable dans une branche de la philosophie anglo-saxonne nommée utilitarisme. Schématiquement, l'utilitarisme défend une thèse selon laquelle la morale a pour but de diminuer la quantité de douleur et de souffrance. Nombre de ses tenants considèrent qu'il n'y a pas lieu de séparer l'animal – qui peut éprouver de la douleur – de l'homme, dans cette lutte contre la douleur.

En extrapolant ces thèses, on mettrait sur le même pied (moral) l'animal et l'homme, avec des conséquences désastreuses pour notre espèce. C'est pourquoi de nombreux auteurs humanistes ont fait valoir, à juste titre, le danger de ces thèses. Réfuter l'animal-objet ne doit pas faire renaître l'animal humanisé.

Sans aller jusqu'à ces excès de l'utilitarisme anglo-saxon, la loi française a subi une série de transformations qui, dans certaines conditions, ont amélioré le statut de l'animal. Les mauvais traitements ont été interdits à l'égard des animaux domestiques ou en captivité (sauf dérogations particulières, par exemple pour les courses de taureaux ou les combats de coqs). L'expérimentation animale a été soumise à de nombreuses

contraintes administratives, telles la nécessité, pour les chercheurs, de posséder une autorisation d'expérimenter limitée à certaines espèces et à certains types d'expériences, l'amélioration de la qualité et du confort des animaleries, ou encore l'anesthésie obligatoire pour les opérations chirurgicales douloureuses chez les vertébrés. Enfin, une modification du Code civil (loi 99-5 du 6 janvier 1999, articles 24 et 25, modifiant les articles 524 et 528) distingue clairement, pour la première fois, l'animal et la chose. En outre, des lois d'inspiration écologique protègent aujourd'hui les espèces sauvages dans leur ensemble, grâce, par exemple, à la création de parcs nationaux, et aux interdictions ou moratoires de la chasse de certaines espèces protégées. Certes, ces mesures restent insuffisantes, comme en témoigne, par exemple, l'absence d'interdiction de disséquer, sans anesthésie, des animaux aussi évolués que la pieuvre ou le homard.

Un grand courant visant à davantage de respect des animaux, en particulier, et de la nature, en général, progresse en France et dans tous les pays occidentaux. Deux courants opposés, tout aussi forts, s'affrontent : un courant de pensée d'origine cartésienne, qui fait de l'homme le maître absolu de son « environnement » et des objets-animaux qui le peuplent, et un courant de pensée anticartésien et écologique, qui veut imposer des limites au pouvoir de l'espèce humaine sur la nature.

Comment concilier ces positions divergentes, voire contradictoires ? Comment s'éloigner de la conception napoléonienne de l'animal-objet, sans tomber dans les excès anthropocentristes ? En France, une conception originale de l'animal-être sensible a été proposée et nous semble répondre aux différentes objections faites tant à l'animal humanisé qu'à l'animal-objet. Ce courant de pensée, qui s'appuie sur une Déclaration universelle des

droits de l'animal, a souvent été mal compris par ses adversaires, qui ont voulu voir des positions utilitaristes, analogues à celles des Anglo-Saxons. Pourtant, ce courant, depuis le début, s'est clairement démarqué de ces positions, puisque, tout en réclamant que l'homme attribue des droits à toutes les espèces animales, il affirme la spécificité des droits de l'homme. Lorsque les droits de l'homme sont en danger, il reconnaît leur priorité face aux droits de l'animal : l'espèce humaine a le droit de défendre sa survie en priorité. C'est le cas, notamment, dans la recherche biologique et médicale, qui vise, à terme, à l'amélioration de la santé humaine.

Toutefois, cette priorité ne doit intervenir que lorsque l'homme est menacé dans ses droits fondamentaux et dans sa survie. Il n'est pas moralement admissible, du fait même de la sensibilité des animaux, de les faire souffrir pour un simple amusement de l'homme, comme, par exemple, dans les jeux sanglants que sont la chasse d'agrément ou les courses de taureaux. Tout en préservant la spécificité de l'espèce humaine, ce courant oppose clairement l'animal à la chose et lutte pour une transformation de la législation napoléonienne, afin qu'à côté des hommes et des objets existe enfin pleinement une catégorie d'« êtres sensibles », protégés par des règlements spécifiques.

Georges CHAPOUTHIER est directeur de recherche au CNRS dans le laboratoire CNRS-Universités Paris 6 et Paris 7, Personnalité et conduites adaptatives.

G. CHAPOUTHIER, *Au bon vouloir de l'homme, l'animal*, Éditions Denoël, 1990. Cl. COMBES et Ch. GUITTON, *L'homme et l'animal. De Lascaux à la vache folle*, Éditions Pour la Science, 1999.



Les quenelles

HERVÉ THIS

Cuisons-les à petit feu après les avoir fait reposer : elles seront meilleures.

Avez-vous déjà fait des quenelles de saumon ou de truite ? Les recettes sont innombrables, mais ce sont des variations sur un thème : à de la chair de poisson finement pilée, on ajoute de la matière grasse (graisse de rognons de bœuf, beurre, crème...) et, éventuellement, de l'œuf et une panade (soit du pain trempé dans du lait, soit une pâte faite par ajout de farine à de l'eau bouillante). Les ingrédients sont longuement travaillés, au point qu'Isabella Beeton, auteur d'un livre de cuisine célèbre en Angleterre depuis 1860, écrit que «les quenelles françaises sont les meilleures du monde, parce qu'elles gonflent davantage». Et elles gonflent, explique-t-elle, parce qu'elles sont plus travaillées.

Pourquoi le travail des quenelles détermine-t-il leur succulence ? Et, d'abord, pourquoi les quenelles «tiennent-elles» à la cuisson même quand elles ne comportent pas d'œuf ? À la Station INRA de Rennes, Florence Lefèvre et Benoit Fauconneau répondent indirectement à la question en explorant les «propriétés thermogélifiantes des myofibrilles de la chair de truite».

En quoi cette recherche consiste-t-elle ? La chair de truite est composée de cellules, les fibres musculaires, qui contiennent notamment des protéines «myofibrillaires» qui assurent la contraction musculaire. Or les protéines en solution dans l'eau forment un gel : comme dans le blanc d'œuf que l'on chauffe, les protéines de la chair de truite se lient, créant un réseau qui piège l'eau (dans une quenelle, ce gel piège également la matière grasse et les grains d'amidon gonflés qui ont été apportés par la panade).

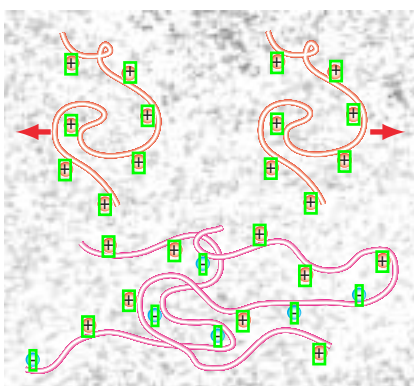
Bien maîtrisée, la gélification permet la confection des quenelles et de divers produits que des sociétés norvégiennes envisagent de produire à partir de salmonidés d'élevage : ces produits seraient culinairement voisins des produits à base de surimis ou des nouilles de poisson fabriquées en Asie. En France, où l'on élève surtout la truite, on cherche aussi à utiliser les protéines de ce poisson pour créer des produits originaux.

Quelles protéines de la chair de poisson forment-elles les gels ? Comme toutes les cellules, les fibres musculaires contiennent des protéines «sarcoplas-

miques», qui assurent leur entretien et leur fonctionnement général, et des protéines myofibrillaires variées ; les principales sont l'actine et la myosine.

F. Lefèvre a d'abord montré que, dans les solutions diluées qui étaient étudiées, c'est principalement la myosine qui gélifie ; l'actine seule ne gélifie pas, mais son incorporation à une préparation de myosine augmente la rigidité du gel.

Dans quelles conditions ce gel se forme-t-il ? Dans les quenelles comme dans les gels de protéines myofibrillaires, le problème est d'associer une grande tendreté (qui résulte d'une quantité d'eau notable) à une fermeté suffisante. Les paramètres qui déterminent la fermeté des gels sont la durée de stockage des



Les protéines s'associent (en bas) quand on minimise les répulsions électrostatiques.

solutions, la vitesse de chauffage, la température maximale de cuisson et, aussi, la concentration en protéines, l'acidité et la concentration en sels.

Pour étudier l'effet de ces divers paramètres, les biochimistes de Rennes ont effectué des tests de pénétrométrie : on enfonce une pointe dans la chair avec une force contrôlée et l'on mesure la déformation. Après avoir montré que ces mesures révèlent bien la fermeté telle que l'évalue le coup de dent, les chercheurs ont analysé les gels formés par cuisson de solutions de protéines isolées et découvert que les concentrations limites de gélification sont de l'ordre de dix milligrammes de protéines par millilitre.

La fermeté dépend du stockage : lors de ce dernier, des interactions entre protéines commencent à former le gel. Puis la fermeté de ce dernier évolue pen-

dant la cuisson. Quelques minutes à des températures comprises entre 70 et 80 °C stabilisent le gel initialement formé, mais la cuisson prolongée fait perdre de l'eau (et donc de la tendreté). Une vitesse de chauffage de 0,25 degré par minute conduit à des gels suffisamment fermes et élastiques.

Le comportement des protéines dépend notablement de l'acidité du milieu, parce que les molécules portent des groupes latéraux ionisables : en milieu acide, les groupes acides des protéines ne sont pas modifiés, mais les groupes basiques se lient à un ion hydrogène : ainsi chargées positivement, les protéines se repoussent et ne s'associent pas. Inversement, en milieu insuffisamment acide, les groupes acides des protéines sont ionisés, et les groupes basiques sont neutralisés, ce qui conduit également à une répulsion. Ainsi, l'acidité de la solution détermine les liaisons entre les protéines, ainsi qu'avec les molécules d'eau. Les acidités optimales pour la formation des gels dépendent des protéines considérées et des espèces animales dont ces protéines sont issues. Les chimistes de l'INRA ont montré que, dans le cas de la truite fario, on optimise la formation des gels quand les solutions de protéines sont placées en milieu plus acide (à un pH égal à environ 5,6) que pour la gélification des protéines d'autres poissons.

Les études permettent enfin de perfectionner la préparation classique des quenelles. Tout d'abord, on laissera la pâte à quenelle longuement reposer, au frais, afin qu'un gel se forme à partir des protéines libérées par les fibres musculaires broyées. Puis on gagnera à cuire les quenelles à four très doux, en chauffant doucement. Enfin, si l'on a un peu acidifié les quenelles, la fermeté conférée par l'acidification permettra d'augmenter la tendreté, par ajout d'eau supplémentaire (par eau, le cuisinier entend évidemment une eau puissamment parfumée : fumet de crustacés, fond de poisson...).

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 29 mai 2000, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.

Peintures pariétales à Bornéo

La grotte Gua Tewet renferme des empreintes de mains décorées de motifs et reliées par un tracé arborescent.

Avant 1992, l'île de Bornéo avait livré très peu de traces préhistoriques d'occupation humaine. Seuls quelques sites des provinces malaises et de l'Émirat de Brunéi, qui représentent un cinquième de l'île, avaient fait l'objet de fouilles avant la fin de la tutelle anglaise : on y avait notamment découvert des os fossiles humains datant de plus de 30 000 ans. C'est dans ce contexte de «quasi-désert» archéologique, à Kalimantan, la partie indonésienne de l'île, que l'archéologue Jean-Michel Chazine, de la maison Asie-Pacifique du CNRS, et le spéléologue Henri Fage sont partis en

expédition dans l'Est de Bornéo. Ce dernier avait repéré des dessins au charbon lors d'une traversée précédente de l'île. Depuis 1992, plusieurs grottes ont été découvertes dans des falaises de calcaire érodées, au milieu de la forêt vierge, où les tribus de Dayaks, anciens coupeurs de tête, sont les seules à s'aventurer. La grotte nommée Gua Tewet, découverte en mai 1999, présente des empreintes de mains uniques au monde : reliées par une ligne, elles forment une sorte de «arbre», et sont ornées de motifs géométriques.

Les grottes ornées se trouvent dans les parties supérieures des falaises de calcaire, isolées et difficiles d'accès (on doit parfois escalader la falaise sur 100 mètres pour les atteindre). Les peintures sont dans la semi-pénombre des zones d'entrée, contrairement à celles de l'art rupestre européen, en général dans l'obscurité. Les empreintes de mains recouvrent le plafond et les parois, jusqu'à dix mètres de hauteur par rapport au sol de la grotte.

Les empreintes de mains ont été réalisées avec la technique du pochoir : les habitants de Bornéo appliquaient leurs mains sur la paroi, puis projetaient la peinture rouge ou ocre à base d'hématite tout autour, en soufflant dans un petit tube ou en crachant cette peinture. On rencontre de telles empreintes de mains au pochoir dans toutes les peintures pariétales du reste du monde. Cependant, à Bornéo, certaines d'entre elles se distinguent par leur disposition en cercle ou en ellipse, évoquant le mouvement circulaire décrit par la main lors de la réalisation des peintures.

Dans la grotte Gua Tewet, qui mesure environ 20 mètres de longueur sur six mètres de largeur, on a dénombré plus de 170 empreintes de mains, mais elles ne sont pas disposées en cercle. Une vingtaine d'entre elles sont reliées par un trait qui évoque une «liane» qui porterait des «fruits». Cette liane fait apparaître

Les grottes ornées de Bornéo sont dans des falaises de calcaire érodé, à plusieurs dizaines de mètres du sol du milieu de la forêt vierge (la flèche rouge marque l'emplacement de la grotte Gua Tewet, en haut). Dans la grotte Gua Tewet, qui renferme plus de 170 empreintes de mains réalisées avec la technique du pochoir, une vingtaine d'entre elles sont reliées par une «liane», qui correspond probablement à un lien familial, social ou clanique entre les individus, dont les empreintes sont ornées par plus d'une trentaine de motifs géométriques différents (en bas).

une arborescence, peut-être l'expression d'une continuité, d'un lien familial, social ou clanique. Les mains sont ornées d'une trentaine de motifs distincts (des traits et des points), peints à l'intérieur des empreintes. Déjà observés en petit nombre dans des grottes découvertes en 1995 et en 1998, ces motifs sont propres à Bornéo. Des animaux filiformes accompagnent les empreintes de mains. Dans les autres grottes ornées, les empreintes de mains sont souvent apposées comme des signatures, à côté de représentations d'hommes ou d'animaux.

Qui a peint ces empreintes de mains et à quelle époque ? Selon J.-M. Chazine, leurs auteurs avaient une culture et un sens de l'esthétique assez évolués : la technique du pochoir met en œuvre une chaîne de gestes opératoires, probablement symboliques et beaucoup plus complexes que pour un dessin ordinaire ; contrairement aux grottes qui s'ouvrent plus bas dans les falaises, où l'on retrouve des restes de foyers, les grottes ornées ne recèlent aucune trace d'activité ou d'installation humaine. Les empreintes de mains seraient des figurations de pratiques magiques, rituelles ou chamaniques.

Ces peintures datent probablement d'une époque antérieure à l'arrivée des Austronésiens, originaires de Taïwan, et qui se sont dispersés dans toute l'Asie du Sud-Est à partir de 5 000 avant notre ère. Plusieurs arguments en attestent : il n'y a pas de relation entre l'expression esthétique des peintures pariétales de Bornéo et l'art des communautés austronésiennes (dont les motifs en spirale ou les rosaces sont complètement différents) ; les poteries, apportées par les Austronésiens, sont absentes des grottes ornées ; on a découvert une stalagmite qui recouvre un panneau d'empreintes de mains et qui aurait plusieurs milliers d'années ; enfin, l'une des peintures représente un bovidé disparu depuis environ 10 000 ans. Ces empreintes de mains pourraient être de la même époque que les peintures pariétales de Sulawesi, l'île indonésienne voisine, datées de 20 000 à 7 000 ans avant notre ère.

Parmi les empreintes de mains ornées d'un motif géométrique, certaines évoquent les représentations avec figuration du squelette stylisé sous forme de traits ou de pointillés des Aborigènes d'Australie et l'on s'interroge : les premières populations de Bornéo ont-elles également assuré le peuplement de l'Australie ?



Diabète sucré

Une protéine favorisant la destruction des cellules qui produisent l'insuline révèle un nouveau mécanisme du diabète.

Le diabète est une «épidémie», certes non infectieuse, mais qui, selon l'Organisation mondiale de la santé, touchera 300 millions de personnes en 2025 : le nombre de personnes atteintes de diabète sucré risque d'avoir doublé entre 1995 et 2025, en raison de l'accroissement et du vieillissement de la population mondiale, ainsi que de l'augmentation de l'obésité dans les pays industrialisés. Les femmes sont plus souvent atteintes que les hommes, et les diabétiques sont plus nombreux en milieu urbain qu'en milieu rural. Contrairement au diabète insulino-dépendant qui touche les personnes jeunes, le diabète sucré se déclare à l'âge adulte et, s'il existe des gènes de prédisposition, les facteurs environnementaux, telle l'obésité, jouent un rôle essentiel dans son déclenchement. La découverte d'un gène qui participe à cette maladie chez quelques personnes éclaire d'un jour nouveau les mécanismes de cette maladie complexe et ouvre la voie à de nouvelles perspectives thérapeutiques.

Plus d'un million de Français sont diabétiques : 20 pour cent d'entre eux ont un diabète de type 1, c'est-à-dire qu'ils ne produisent pas du tout d'insuline et doivent s'administrer quotidiennement l'hormone (l'insuline est indispensable au métabolisme du glucose ; quand elle n'est pas produite, la concentration sanguine en glucose est trop élevée) ; 80 pour cent sont atteints de diabète de type 2, non insulino-dépendant, encore nommé diabète sucré.

Contrairement au cas du diabète de type 1, le pancréas produit encore de l'insuline, mais la quantité produite est insuffisante ou l'insuline est inactive. Des médicaments stimulent la production d'insuline par les cellules bêta des îlots pancréatiques de Langerhans, mais ils finissent par devenir inefficaces, et les personnes atteintes doivent alors s'administrer de l'insuline, comme les personnes atteintes de diabète de type 1. L'obésité est un facteur de risque du diabète de type 2, car le métabolisme général est perturbé : les cellules adipeuses produisent une cytokine, le TNF, qui dérègle le fonctionnement du récepteur de l'insuline, lequel devient insensible à l'hormone. Le transport du glucose se fait mal et sa concentration sanguine reste élevée.

A long terme, l'hyperglycémie chronique endommage les vaisseaux sanguins qui irriguent notamment la rétine, les reins et le système nerveux, de sorte que le diabète s'accompagne souvent de rétinopathie diabétique, d'insuffisance

BRÈVES

Du Viagra® pour les femmes

Le Viagra® qui traite l'impuissance masculine aurait une indication féminine : il aiderait les œufs fécondés à s'implanter dans la matrice utérine des femmes qui ne peuvent avoir d'enfants parce que leur paroi utérine est trop mince et mal irriguée. La molécule potentialise les effets vasodilatateurs du monoxyde d'azote NO et améliore le flux sanguin. Après traitement par le Viagra®, trois grossesses ont pu être déclenchées et deux enfants sont déjà nés. La question principale qui subsiste est celle de l'effet potentiellement nocif du monoxyde d'azote sur les embryons : l'implantation de l'embryon n'a lieu qu'une semaine après la dernière administration du Viagra® quand on est certain qu'il a été éliminé de l'organisme maternel.

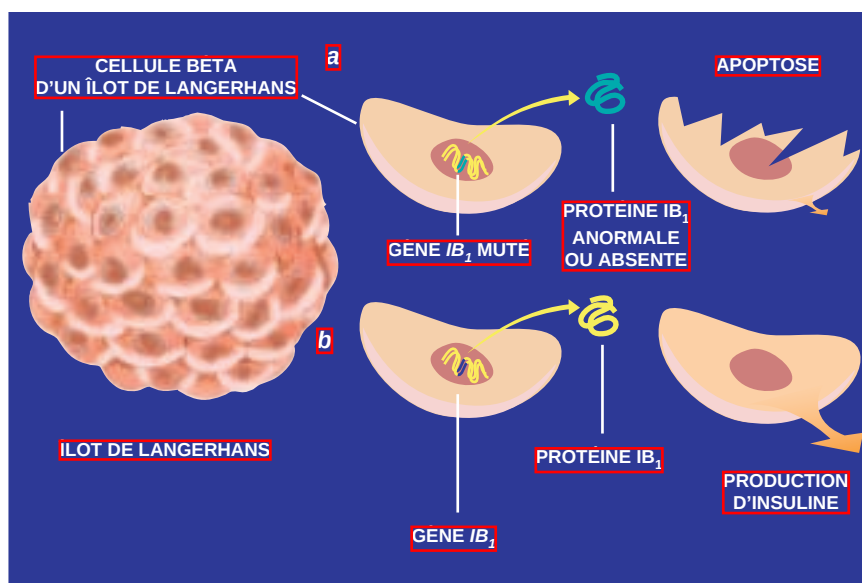
Récompense simiesque

Une équipe américaine a montré que les singes capucins d'Amérique du Sud coopèrent pour obtenir de la nourriture et partagent ensuite les fruits de leurs efforts conjoints. Ainsi deux singes sont séparés par une grille ; un bol contenant des tranches de pommes est placé en face d'un des deux singes, sur un plateau ; ce dernier est trop lourd pour qu'un seul singe puisse le rapprocher suffisamment et se saisir du bol ; les deux singes tirent donc ensemble sur le plateau, le singe face au bol s'en saisit et partage les pommes avec son coéquipier. En liberté, les capucins et les chimpanzés chassent à plusieurs, mais un seul capture la proie, laquelle est ensuite partagée. Coopération et réciprocité ne sont pas des spécificités humaines.



Des bifaces chinois

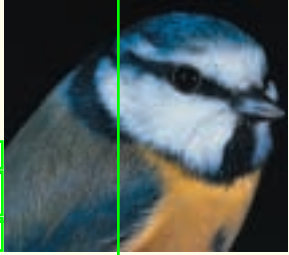
Les silex taillés sur les deux faces du type acheuléens (du nom du village de Saint-Acheul, près d'Amiens) sont apparus il y a 1,7 million d'années en Afrique. On en a aussi retrouvé en Afrique, en Europe et en Asie occidentale. Dans le bassin de Bose, au Sud de la Chine, une équipe sino-américaine a mis au jour de nombreux bifaces vieux de 800 000 ans. Ainsi, l'Asie orientale a également été un foyer du savoir-faire des hominidés en matière de pierre taillée.



Les cellules bêta des îlots pancréatiques de Langerhans produisent normalement l'insuline qui normalise la concentration sanguine en sucre. Chez les diabétiques, la production d'insuline est insuffisante. On a découvert que chez certains d'entre eux, le gène IB_1 est muté de sorte que la protéine IB_1 correspondante est anormale, voire n'est pas synthétisée (a). On constate alors que les cellules des îlots de Langerhans ne produisent plus d'insuline et s'autodétruisent par apoptose. La protéine IB_1 , protégerait les cellules contre le suicide cellulaire et activerait l'expression du gène de l'insuline (b).

Les nuances de bleu des oiseaux

Les oiseaux voient dans l'ultraviolet, grâce à un quatrième type de cellule en cône dans leur rétine, alors que les hommes et les primates n'en ont que trois. Grâce à ces cellules, découvertes à l'Institut d'ophtalmologie de Londres, certains oiseaux reconnaissent les mâles des femelles de leur espèce : chez les mésanges bleues, la différence de plumage entre les deux sexes, difficile à distinguer même pour un ornithologue, est nette dans l'ultraviolet.



L'acier recyclé : plus dur, moins cher

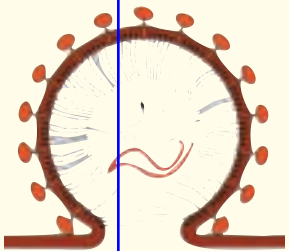
Les métallurgistes de l'Université de Leed ont découvert comment éliminer les défauts dus à la présence de cuivre et d'étain dans l'acier recyclé : en ajoutant de l'aluminium, qui forme un alliage avec ces métaux. L'acier obtenu est plus dur et sa mise en œuvre, simplifiée, est moins coûteuse : elle ne nécessite aucun triage préalable des déchets pour éliminer les autres métaux. En outre, les canettes de sodas apportent l'aluminium nécessaire au nouveau procédé.

Clé faussée

Les personnes infectées par le VIH ne réagissent pas toutes de la même façon, et leur espérance de vie est variable. Pour infecter ses cellules cibles, le virus se fixe sur le récepteur CD4 des lymphocytes T, mais il se sert d'autres «clés» pour pénétrer dans ces cellules. On avait trouvé que lorsqu'une des secondes clés

est faussée, le virus pénètre moins facilement dans les lymphocytes T (certaines mutations sur le gène codant le corécepteur CCR5 semblent protéger contre le virus). Inversement, l'équipe de C. Com-

badière et I. Théodorou vient de montrer que les personnes dont les deux gènes codant le corécepteur CX3CR1 portent deux mutations bien caractérisées évoluent deux fois plus vite vers la phase SIDA que les autres. Le dépistage de ces mutations chez les personnes séropositives aiderait les médecins à prévoir la rapidité de l'évolution de la maladie et à ajuster les traitements.



rénale, de neuropathie diabétique (des douleurs d'origine neurologiques) ou encore d'ulcération des pieds (qui nécessite parfois l'amputation).

Etudiant des cultures de cellules bêta de Langerhans, Gérard Waeber et ses collègues du Centre hospitalo-universitaire de Genève ont isolé un nouveau gène, le gène IB_1 , qui s'exprime spécifiquement dans ces cellules et dans le cerveau. Lorsque ce gène est muté, les cellules bêta sont plus sensibles aux stress et meurent plus facilement que les cellules où le gène n'est pas muté. Les cellules bêta ont une durée de vie réduite et, de surcroît, elles produisent moins d'insuline. Ces deux résultats montrent que la protéine IB_1 a deux actions : d'une part, elle inhibe l'apoptose, ou suicide cellulaire (puisque en son absence les cellules s'auto-détruisent plus vite) et, d'autre part, elle active l'expression du gène de l'insuline (puisque en son absence la synthèse de l'hormone diminue).

Ce gène ayant à l'évidence une action potentielle dans le diabète, Philippe Froguel et ses collègues de l'Institut de biologie de Lille ont recherché si certains diabétiques avaient une mutation sur le gène IB_1 . Généralement, le diabète de type 2 n'est pas une maladie génétique transmissible, mais, dans ce cas, l'équipe lilloise a trouvé une famille de diabétiques ayant une mutation sur le gène IB_1 , localisé sur le chromosome 11. En l'absence de la protéine IB_1 , la production d'insuline est insuffisante, mais les cellules bêta des îlots de Langerhans en produisent pourtant quelques temps, puis ces cellules subissent une apoptose et l'insuline n'est plus produite. Cette évolution est compatible avec les réactions des malades aux traitements qui stimulent la production d'insuline : dans un premier temps, les médicaments activent la production d'insuline, mais ils finissent par devenir inefficaces, car les cellules productrices disparaissent. On pense qu'une hyperglycémie chronique inhiberait l'expression du gène IB_1 .

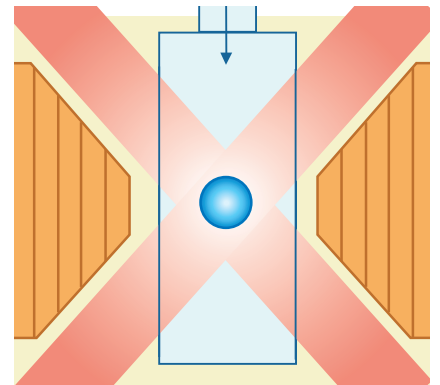
Des substances qui compenseraient le déficit de la protéine IB_1 ralentiraient le phénomène et éviteraient peut-être aux cellules de Langerhans encore fonctionnelles de rentrer dans le processus irréversible du suicide cellulaire. Par ailleurs, même si l'on ignore quelles cellules cérébrales expriment cette protéine (les souris transgéniques dépourvues de ce gène meurent avant la fin de l'embryogenèse), on espère que la protéine joue aussi un rôle dans l'inhibition de l'apoptose des neurones et qu'en renforçant son action, on retarderait certaines neurodégénérescences.

Tempête à zéro degré

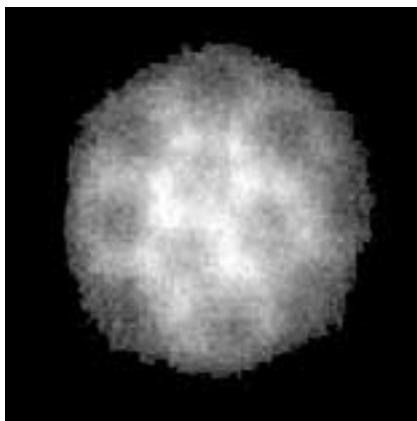
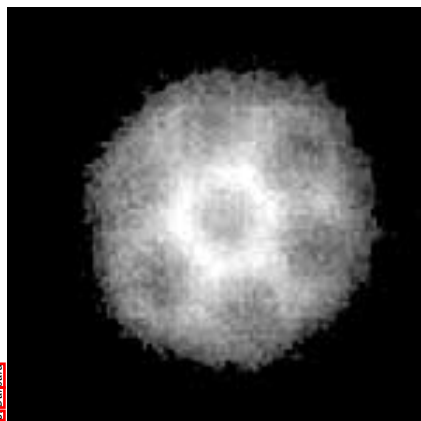
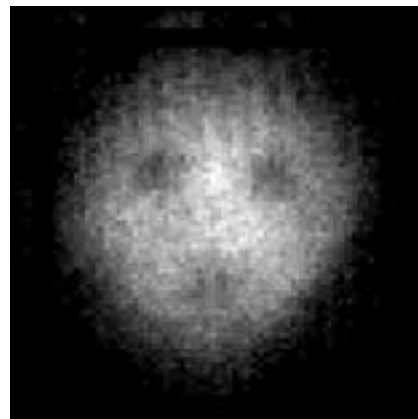
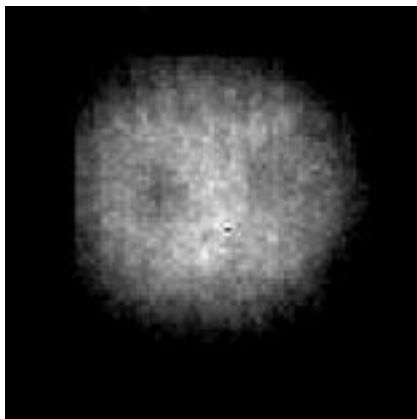
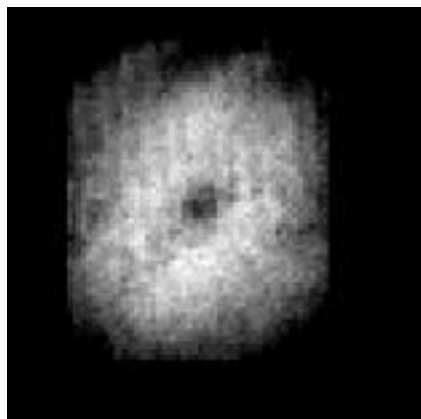
Des physiciens ont observé des tourbillons dans les condensats de Bose-Einstein

Il y a 75 ans, Einstein avait prédit qu'aux températures proches du zéro absolu (-273°C), certains gaz parfaits se condensent en fluides dont les atomes sont indiscernables. «C'est une belle théorie, mais contient-elle une vérité?», écrivit Einstein à un ami avant de se détourner définitivement de ce problème. Depuis 1995, les physiciens ont réussi à produire ces fluides surprenants, nommés condensats de Bose-Einstein (Einstein s'était inspiré des travaux de Bose pour prédire leur existence). À l'École normale supérieure de Paris, Jean Dalibard et ses collègues ont mis en évidence des tourbillons dans ces condensats, qu'ils sont parvenus à mettre en mouvement.

Les condensats de Bose-Einstein, constitués d'environ un million d'atomes de rubidium, de lithium, de sodium ou d'hydrogène, se forment à des températures de l'ordre de 300 nanokelvins (300 milliardièmes de degré au-dessus du zéro absolu) à partir de gaz presque parfaits, peu denses. Ils ont une durée de vie de quelques secondes. Pour les obtenir, on refroidit un milliard d'atomes, placés dans un dispositif sous vide, à l'aide d'un jeu de lasers :



Pour produire des condensats de Bose-Einstein, les physiciens introduisent des atomes de rubidium dans un dispositif sous vide (flèche). Ils les refroidissent avec des lasers (en rouge), qui ralentissent les atomes, et avec des champs magnétiques, créés par des bobines coniques (en orange). Quand la température atteint 300 nanokelvins, la condensation se produit et les atomes se comportent comme une même entité (en bleu). Les physiciens ont réussi à créer des tourbillons dans ces condensats à l'aide d'un faisceau laser, une sorte d'«agitateur», perpendiculaire au plan de la figure.



Les trous qui apparaissent dans ces condensats de Bose-Einstein correspondent à des tourbillons. Les atomes sont repoussés loin de l'axe de rotation, comme sous l'effet d'une force centrifuge. Le nombre de tourbillons augmente avec la fréquence de l'agitateur, pour former un réseau ordonné.

l'interaction des lasers et des atomes ralentit ces derniers, ce qui les refroidit. Puis, on comprime ces atomes en les piégeant, au centre du dispositif, avec des champs magnétiques. Un certain nombre d'atomes, trop rapides, sont éjectés du piège magnétique, emportant une énergie qui est alors prélevée aux atomes qui restent piégés : la température de ces derniers est encore abaissée, et la condensation de Bose-Einstein se produit.

Tous les atomes des condensats sont dans le même état d'énergie minimale. En mécanique quantique, les particules sont assimilées à des ondes. Dans un condensat, les atomes ont tous la même fonction d'onde, c'est-à-dire qu'on ne peut pas les distinguer, car ils se comportent comme une même entité.

On a découvert que les condensats sont des superfluides : ils se comportent comme l'hélium liquide à très basse température. Dans un superfluide, un objet qui se déplace lentement n'est pas freiné, et le superfluide ne s'échauffe pas. Quand on met un récipient contenant un superfluide en rotation lente, la surface de celui-ci reste plane, car il n'est pas entraîné par les parois. Au contraire, la surface d'un

liquide classique se creuse en son centre à cause des forces d'adhérence aux parois.

Les physiciens de l'École normale supérieure ont étudié la dynamique des condensats. Ils ont travaillé sur des condensats d'atomes de rubidium, qu'ils ont mis en rotation à l'aide d'un faisceau laser, une sorte d'«agitateur». Ils ont constaté qu'au-dessous d'une fréquence critique de rotation de l'agitateur, rien ne se passe : le condensat reste au repos. En revanche, au-dessus de ce seuil, un tourbillon apparaît au centre du condensat. L'existence de ce seuil est due à la nature quantique des condensats : un gaz classique (ou un liquide classique) serait mis en mouvement quelle que soit la fréquence de l'agitateur.

Les physiciens ont observé ce tourbillon en interrompant les champs magnétiques qui confinent le condensat. Ce dernier se dilate et, au bout de quelques dizaines de millisecondes, le tourbillon a une taille suffisante pour être observé. Les physiciens envoient alors sur le condensat une brève impulsion lumineuse, dont ils mesurent ensuite l'absorption : ils obtiennent ainsi une image du nuage

atomique. Dans le tourbillon, les atomes sont repoussés loin de l'axe de rotation, comme sous l'effet d'une force centrifuge : le tourbillon apparaît ainsi sous la forme d'un trou.

Lorsque les physiciens ont augmenté la fréquence de l'agitateur laser, ils ont observé la formation d'un réseau ordonné de tourbillons de tailles identiques. Le nombre de tourbillons augmente avec la fréquence, jusqu'à onze. Ces tourbillons sont visibles à l'œil nu : leur diamètre est de l'ordre de huit micromètres au moment où on les «photographie». On avait déjà observé des réseaux de tourbillons dans l'hélium liquide, mais, leur diamètre étant inférieur au nanomètre (milliardième de mètre), on ne pouvait pas les observer directement. Pour les visualiser, on envoyait sur l'hélium liquide des électrons, qui étaient canalisés par les tourbillons et déclenchaient un phénomène de luminescence sur un écran au phosphore, grâce auquel ils étaient détectés.

La mise en évidence des tourbillons constitue un pas en avant dans la compréhension et la modélisation des condensats de Bose-Einstein, car on sait désormais qu'ils obéissent aux théories développées pour les superfluides. Les physiciens espèrent mettre au point des jets d'atomes cohérents et intenses issus de condensats de Bose-Einstein, analogues aux lasers, mais constitués d'atomes et non de photons. Ils seraient utilisés pour la nanolithographie atomique. La parfaite collimation de ces atomes cohérents en ferait des outils de déposition très précis. Si l'on sait d'ores et déjà extraire un filet continu d'atomes d'un condensat, on devra encore trouver le moyen de guider ces atomes sur une surface pour y reproduire un motif donné et augmenter le flux d'atomes que peut fournir un condensat (qui ne contient pour l'instant qu'un million d'atomes) : le «laser à atomes» deviendra alors, comme son équivalent lumineux, un outil pratique.

Plastique biodégradable

Les bactéries sont en passe de fournir à l'homme des plastiques biodégradables, des polyhydroxycarboates, qu'elles synthétisent naturellement pour constituer des réserves énergétiques lorsque le milieu s'appauvrit. Toutefois, ce comportement n'est qu'un dernier recours, car en grande quantité, ces longues molécules sont agressives et détruisent les bactéries. En régulant la température et les sources de carbone et d'azote, une équipe suisse a réussi à empêcher cette destruction qui interdisait toute exploitation. Les biochimistes font fabriquer aux bactéries quelques centaines de grammes de bioplastiques par bioréacteur et espèrent atteindre bientôt une production de l'ordre du kilogramme.

Mammouth surgelé

Un courageux paléontologue américain, Daniel Fisher a conservé de la viande de cheval pendant plusieurs mois sous la surface d'un lac gelé. Puis il en a mangé quelques bouchées, pour prouver qu'il y a 10 000 ans, les Américains dirigeaient les mammouths vers un lac gelé afin d'y conserver la viande. Ce stockage était attesté par des montagnes d'os au fond des lacs, mais il fallait convaincre les incrédules de la comestibilité de la viande ainsi conservée. D. Fisher a affirmé être prêt à manger de la viande de mammouth de l'époque.



Maladie du sommeil

La mouche **tsé-tsé véhicule** le trypanosome, le parasite de la maladie du sommeil. Comme beaucoup d'agents pathogènes le trypanosome est un agent caméléon : dès que le système de défense produit des anticorps dirigés contre l'un des antigènes de surface, le parasite se pare de nouveaux antigènes contre lesquels le système immunitaire doit à nouveau apprendre à lutter. Or ces antigènes de surface sont ancrés grâce à des substances dont la synthèse requiert un acide gras : on pensait que le parasite était incapable de le synthétiser et qu'il le prélevait dans son environnement. Or on vient de découvrir que le parasite en assure lui-même la synthèse. Un antibiotique inhibe cette synthèse dépouillant le parasite de sa couverture antigénique qui le protège du système immunitaire qui, dès lors, peut détruire le parasite.

Nucléosynthèse légère

Des échantillons lunaires révèlent des mécanismes de physique nucléaire dans le Soleil.

La plupart des atomes qui nous constituent ont été créés lors de la fusion des noyaux légers dans des étoiles comme le Soleil. D'autres atomes ont été synthétisés lors d'explosions d'étoiles, les supernovae. Certains éléments, parmi les plus légers, ont été créés dans les premières minutes du Big Bang. C'est notamment le cas du lithium 7. Une autre variété du lithium, le lithium 6, qui comprend trois neutrons au lieu de quatre pour le lithium 7, a été créée au cours de l'histoire de l'Univers, lors d'interactions entre les atomes du milieu interstellaire et ceux du rayonnement cosmique de haute énergie, des particules qui se déplacent à grande vitesse dans notre Galaxie.

Ces deux isotopes du lithium sont détruits au sein des étoiles par les réactions nucléaires. En mesurant la quantité de lithium 7 contenue dans des échantillons lunaires par rapport à celle de lithium 6, nous avons montré que, contrairement à toute attente, du lithium 6 est fabriqué dans le Soleil.

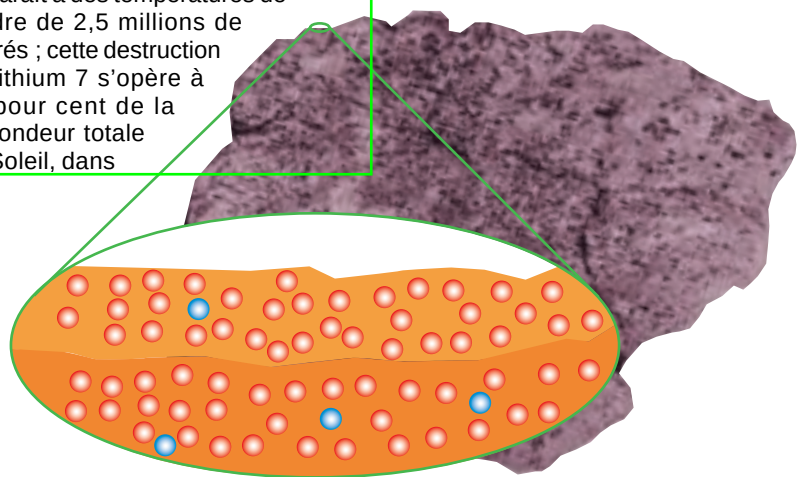
Dans les étoiles, les deux variétés du lithium sont détruites efficacement par des réactions de fusion avec l'hydrogène, mais ces réactions se font à des températures différentes et, donc, à des profondeurs différentes. Dans le Soleil, le lithium 6 est détruit tout près de la surface, à une température de 800 000 degrés, alors que le lithium 7 disparaît à des températures de l'ordre de 2,5 millions de degrés ; cette destruction du lithium 7 s'opère à 30 pour cent de la profondeur totale du Soleil, dans

la zone convective, où de grands mouvements de gaz ramènent du matériau profond du Soleil en surface (et réciproquement).

A partir de ces données, les astrophysiciens avaient avancé deux hypothèses : la première est qu'une grande partie du lithium initialement présent dans le Soleil avait été détruite au cours des 4,5 milliards d'années de son histoire. Cette hypothèse a été vérifiée grâce à l'analyse spectroscopique de la lumière solaire qui révèle la nature des éléments chimiques présents dans l'atmosphère du Soleil : la concentration en lithium à la surface du Soleil est 150 fois inférieure à celle du gaz qui a donné naissance au Soleil.

Seconde hypothèse : le lithium qui a survécu dans le Soleil devrait être presque uniquement du lithium 7, car le lithium 6 est détruit à une température inférieure. Dans toutes les classes de météorites, dans la Terre ou dans la Lune, la proportion de lithium 7 par rapport au lithium 6 est rigoureusement constante, environ un atome de lithium 6 pour 12 de lithium 7. Nous connaissons donc aussi la composition isotopique du Soleil initial. Du fait de la combustion préférentielle du lithium 6, les théoriciens prévoyaient dans le Soleil une quantité de lithium 7 un million de fois supérieure à celle de lithium 6.

Pour vérifier cette hypothèse, il fallait analyser la composition du vent solaire, une émission continue d'atomes en provenance de l'atmosphère du Soleil. Ces particules, dont la composition est voisine de celle du Soleil, voyagent dans le milieu interplanétaire. Pour en trouver une quantité suffisante, il fallait identifier un endroit où ces particules avaient pu s'accumuler



En analysant un échantillon de roche lunaire bombardé par le vent solaire, les physiciens ont trouvé que les premières couches atomiques contenaient un atome de lithium 6 (en bleu) pour 30 atomes de lithium 7 (en rouge), alors qu'on pensait que le lithium 6 avait presque entièrement disparu, brûlé dans le Soleil. Cette mesure indique que du lithium 6 est créé en permanence dans le Soleil.

pendant au moins une centaine de millions d'années.

Dépourvue d'atmosphère, la Lune recueille le vent solaire. Les particules du vent solaire bombardent continuellement notre satellite et s'implantent dans les roches pulvérulentes du sol lunaire, sur quelques nanomètres d'épaisseur (un micromètre au maximum). Jusqu'à aujourd'hui, seuls les éléments volatils, comme les gaz rares, l'azote ou le carbone, ont pu être extraits par chauffage sous vide des échantillons lunaires. Grâce aux nouvelles sondes ioniques, nous avons bombardé les échantillons lunaires sur des surfaces de 100 micromètres carrés et nous en avons analysé les premières couches atomiques.

Ces couches renferment en profondeur du lithium lunaire dont la composition isotopique est semblable à celle de toutes les météorites : un lithium 6 pour douze lithium 7. En revanche, dans les dix premières couches atomiques de la surface des échantillons, le lithium émis est fortement enrichi en lithium 7 par rapport au lithium 6. Ce composant de surface résulte de l'implantation du vent solaire dans le sol lunaire.

Contre toute attente, le rapport entre les deux isotopes ($^7\text{Li}/^6\text{Li}$), n'est pas d'un million, mais d'une trentaine. Le Soleil est donc bien plus riche en lithium 6 que ne le laissent prévoir les théories classiques. Comme la vitesse de destruction du lithium 6 est établie à l'aide des théories nucléaires corroborées par de nombreuses autres études, nous en concluons qu'il existe une source de lithium 6 dans le Soleil. Le lithium 6 résulterait de collisions à haute énergie entre noyaux de carbone et d'oxygène dans l'atmosphère solaire : ces collisions casseraient ces noyaux en noyaux plus petits.

Ainsi, la vitesse de synthèse du lithium est nécessairement supérieure à celle de sa destruction par le recyclage en profondeur dû à la convection. L'analyse poussée d'autres échantillons lunaires ayant résidé sur notre satellite à des périodes différentes des échantillons déjà étudiés (de tels échantillons ramenés par les missions *Apollo* existent dans les collections de la NASA) précisera la variation des vitesses de production et de recyclage du lithium au cours de l'histoire du Système solaire. À l'instar des éclipses totales de Soleil qui renseignent sur la couronne solaire, les échantillons lunaires nous informent sur la physique nucléaire à l'intérieur du Soleil.

Marc CHAUSSIDON,
CRPG-CNRS, Nancy,
François ROBERT, MNHN, Paris

Détection gamma sensible

Une caméra sensible au rayonnement gamma traquera les supernovae enfouies.

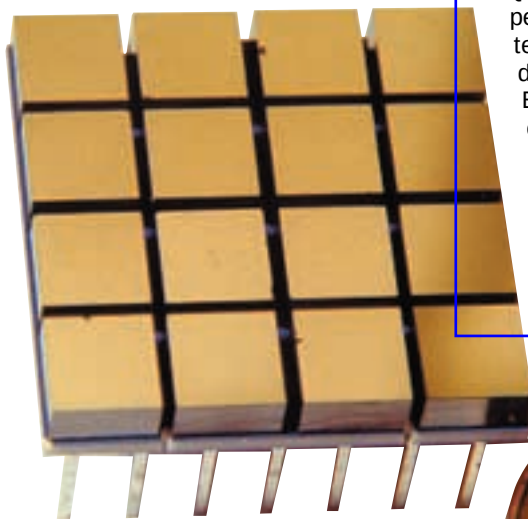
Comment voir les supernovae malgré la matière qu'elles éjectent ou les trous noirs cachés par la poussière ? En les observant dans le domaine du rayonnement gamma, car ce rayonnement électromagnétique de très haute énergie traverse les milieux les plus denses. Pour le détecter, les astronomes lanceront, début 2002, l'observatoire spatial INTEGRAL, sensible aux photons de haute énergie. À bord de cet observatoire, les ingénieurs placeront le télescope gamma IBIS, muni d'un détecteur d'une sensibilité inégalée.

Le télescope IBIS est le descendant direct du télescope spatial français SIGMA qui, au début des années 1990, a fourni les premières images du ciel dans le domaine gamma. Ces télescopes fonctionnent sur le principe du masque codé : au sommet du télescope, un masque laisse passer la lumière en des endroits judicieusement choisis. Lorsque les photons entrent dans le télescope, ils éclairent le détecteur, situé au fond, selon un motif qui dépend du masque et de la position de la source qui l'éclaire. La résolu-

tion angulaire dépend du pas du masque, c'est-à-dire de la taille des plus petits motifs qui y sont dessinés. Sur SIGMA, le détecteur était une caméra gamma à scintigraphie inspirée de celles qui sont utilisées dans les hôpitaux. Sa résolution et sa sensibilité étaient médiocres.

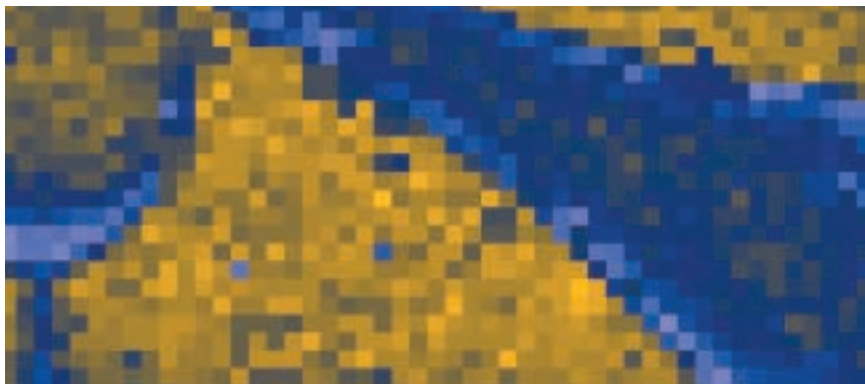
Pour l'améliorer, les ingénieurs ont fait appel à une technique différente. Le détecteur n'est plus constitué d'une mosaïque de photomultiplicateurs qui collecte la lumière d'un gros cristal scintillant, mais d'une mosaïque de 16 384 pixels formés chacun d'un petit cristal semiconducteur de tellure de cadmium. Ces détecteurs autorisent une mesure bien plus précise de l'énergie des photons détectés. Dix fois plus légère que SIGMA, cette caméra a un bruit de fond bien inférieur et sa surface de détection est quatre fois supérieure. Grâce à cette technique, le télescope IBIS effectuera en cinq ans un travail de détection qui aurait demandé cinq siècles d'observation à SIGMA.

La réalisation de ce détecteur révolutionnaire tient à plusieurs facteurs. D'abord, les progrès en cristallogénèse ont permis la fabrication de cristaux de tellure de cadmium suffisamment purs pour une détection efficace des photons gamma (les impuretés perturbent la mesure de l'énergie). Ensuite, il a fallu mettre au point un circuit intégré capable de traiter les signaux qui arrivent sur chacun des détecteurs élémentaires. Au CEA, nous avons conçu une telle puce, résistante aux radiations spatiales, qui traite les signaux issus de quatre détecteurs. Quatre de ces puces collées sur une petite plate-forme de céramique traitent ainsi les signaux provenant de 16 détecteurs (voir la figure 1). En soudant côte à côte 1 024 de ces micro-caméras, nous avons construit le premier prototype de caméra gamma hypersensible que nous avons essayé en « gammagraphiant » une bouteille et un verre (voir la figure 2). La mise au point de cette technique de micro-caméra



1. Élément de base du détecteur : 16 cristaux de tellure de cadmium collés sur une plate-forme de céramique. De l'autre côté, quatre puces traitent chacune le signal en provenance de quatre cristaux. Le détecteur comprend 1 024 de ces éléments.





2. Radiographie gamma d'une bouteille et d'un verre. Comme dans une radiographie classique, l'objet radiographié est placé entre le détecteur et une source de rayonnement, ici une source gamma de cobalt 57. En absorbant le rayonnement de la source, ces deux objets apparaissent en négatif sur l'image.

permet d'entrevoir la fabrication de télescopes gamma beaucoup plus petits, adaptés aux micro-satellites, dont le développement est en plein essor.

Au carrefour des progrès en cristallographie et en microélectronique, cette caméra ne servira pas uniquement à traquer les sources gamma cosmiques : dans un avenir proche, les micro-caméras gamma seront utilisées pour l'analyse de la fluorescence *in situ* du sol martien, à la recherche de traces d'éléments lourds. À plus long terme, ce type de caméra pourra être utilisée à l'hôpital pour des gammagraphies plus contrastées avec une irradiation réduite du patient.

François LEBRUN,
Service d'astrophysique, CEA, Saclay

L'art du mélange

Une technique de coloration révèle les tours de main des peintres de la Renaissance.

Les tableaux anciens sont constitués pour une large part de composés organiques *a priori* fragiles. Pourtant ils ont traversé les siècles grâce à la remarquable mise en œuvre de leurs matériaux, leur «formulation». Quels secrets des peintres assuraient-ils une si bonne conservation des œuvres? Nous avons examiné cette question à l'aide d'une technique de coloration des protéines présentes dans les couches picturales.

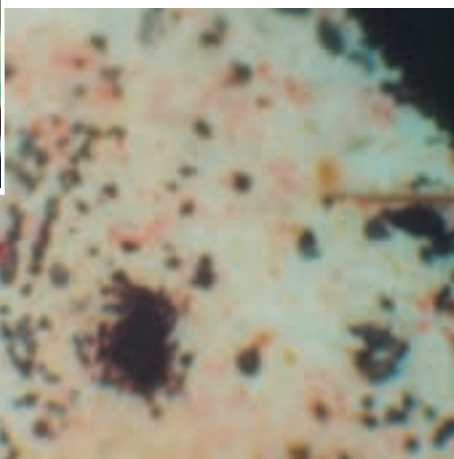
Les peintures de la Renaissance sont constituées d'une superposition de couches très minces (d'épaisseur comprise entre 10 et 50 micromètres), composées de pigments, de charges et de

liants. Ces couches sont déposées sur un support (bois ou toile) revêtu d'une couche de préparation et protégées par un vernis. L'étude des manuscrits et livres techniques anciens, tel *Il Libro del Arte* de Cennino Cennini (fin du XIV^e siècle), donne une idée des liants employés, éléments essentiels des peintures puisqu'ils assurent la cohésion des diverses couches. Jusqu'à la Renaissance, les liants étaient majoritairement constitués de protéines extraites de peaux, tendons et os («colle de peau»), du lait caillé (caséine) ou de l'œuf (jaune seul ou œuf entier). Puis, lorsque la peinture à l'huile se généralisa, le liant devint une huile siccative, c'est-à-dire polymérisable en présence de l'oxygène de l'air (huile de lin, d'œillette, de noix).

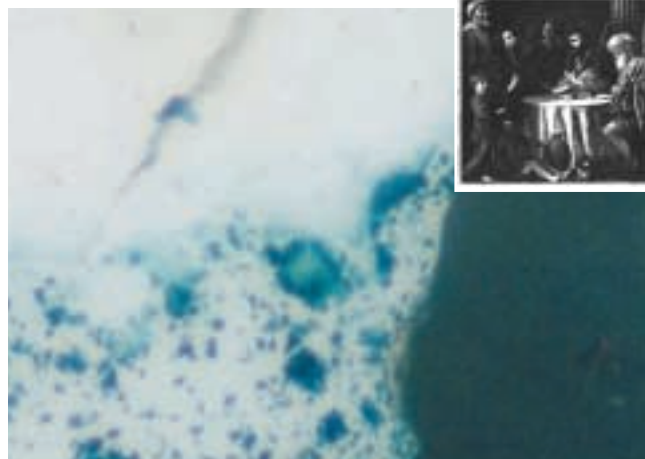
Quelle est la composition des liants utilisés? Quelles en sont les caractéristiques dans les divers courants artistiques? Quels sont les tours de main propres à chaque artiste? Comment

restaurer les œuvres si besoin est sans risquer de provoquer des altérations ultérieures?

Le Centre de recherche et de restauration des Musées de France, au Musée du Louvre, a mis au point une technique de coloration, dérivée des méthodes histochimiques, afin de caractériser les protéines des couches picturales dans des coupes stratigraphiques (40 à 80 micromètres d'épaisseur) ou dans des écailles de petites dimensions (100 à 500 micromètres). Parmi les colorants classiques des protéines, seule l'utilisation de «Noir Amido» ou «Naphтол Blue Black» à trois pH différents permet de différencier des couches picturales peintes à l'œuf de celles qui sont étendues à la colle : selon le pH (qui mesure l'acidité), des protéines différentes réagissent avec le colorant (l'œuf se colore à pH égal à 2, la gélatine à pH 7, et l'ensemble des protéines à pH 3,6). Ainsi nous avons découvert que les



Ecaille issue du tableau *La Diseuse de Bonne Aventure* du Caravage, après coloration : les amas de protéines apparaissent en bleu, le pigment rouge est le vermillon (grossissement : $\times 100$)



Ecaille issue du tableau *Les pèlerins d'Emmaüs* de Le Nain, après coloration. La partie supérieure de l'écaille est recouverte d'un vernis qui inhibe l'action du colorant ($\times 100$).

couches peintes sur lesquelles de minces feuilles d'or étaient déposées pour la réalisation de fonds dorés, étaient généralement étendues à la colle de peau, et non avec du blanc d'œuf ainsi que le recommandait Cennino Cennini.

Ces études par des colorations révèlent des évolutions des techniques picturales telle l'utilisation d'émulsions. L'utilisation de liants qui mélangent huile siccatrice et protéines sous forme d'émulsion facilite l'étalement et accélère le séchage, tout en améliorant la représentation des chairs ou des couleurs claires (les couches ne jaunissent pas). Ces liants émulsionnés ont été utilisés par de nom-

breuses écoles artistiques : par les Italiens (Raphaël, Léonard de Vinci, etc.), par les Espagnols du Siècle d'Or, par les Flamands tels que Rubens.

L'action du «Noir Amido» sur un micro-prélèvement de peinture issu du poignet du jeune homme du tableau *La Diseuse de Bonne Aventure* du Caravage révèle des amas de protéines de taille comprise entre 2 et 10 micromètres qui apparaissent fortement colorées en bleu au sein de la matrice huileuse, demeurée claire. Cette technique de coloration *in situ* permet de caractériser la taille des amas, la finesse et l'homogénéité de leur répartition, lesquelles sont caractéristiques de

chaque artiste. Ainsi l'émulsion utilisée par Le Nain pour représenter un rehaut de la nappe blanche dans *Les pèlerins d'Emmaüs* diffère de celle utilisée par Le Caravage, aussi bien par la taille des amas que par leur répartition.

La technique de coloration mise au point révèle ainsi l'art des peintres, mais elle peut évidemment dépister aussi les contrefaçons. Nous l'utilisons aujourd'hui pour analyser le vieillissement des couches peintes.

Cécile CREN-OLIVÉ, Jean-Marie AUBRY, Christian ROLANDO, Elisabeth MARTIN, Université de Lille et L. R. M. F.

Les neuropuces

Toutes les cellules du cerveau sont différentes ! Aux débuts de la neurologie, l'anatomie constituait le seul critère de différenciation : par exemple, on a ainsi distingué les neurones pyramidaux, dont le corps cellulaire a la forme d'une pyramide. Puis, avec le développement de l'électrophysiologie, les neurones ont été classés selon les propriétés du signal électrique qui parcourt leur axone : chaque neurone est caractérisé par les propriétés physiques du signal électrique qu'il véhicule. Enfin, avec l'avènement de la biologie moléculaire, les neurones ont été définis par les molécules qu'ils synthétisent et, notamment, par les neuromédiateurs qui permettent au signal électrique de franchir les espaces – les synapses – qui séparent les neurones. Toutefois, chacune de ces méthodes n'autorise la distinction que de groupes de neurones qui, malgré des points communs, sont différents.

En utilisant des biopuces, capables de détecter des dizaines de molécules simultanément, l'équipe de Jean Rossier, de l'École supérieure de physique et de chimie industrielles, a perfectionné l'analyse moléculaire des cellules nerveuses et mis au point des méthodes d'étude des gènes exprimés. Depuis quelques années, l'électrophysiologie et la biologie moléculaire ont allié leur pouvoir pour l'étude des neurones : on enregistre le signal électrique qui parcourt le neurone dont on aspire ensuite le contenu ; on y identifie les ARN messagers qui reflètent l'activité des gènes. Selon les besoins des cellules, les gènes sont transcrits sous forme d'ARN messagers, à partir desquels les protéines sont synthétisées. Lorsqu'on caractérise les ARN messagers présents, on connaît les protéines synthétisées par une cellule à instant donné.

Jusqu'à présent, chaque ARN messager prélevé était recopié en grand nombre, sous forme d'ARN complémentaire, par une technique nommée PCR. Les molécules amplifiées étaient identifiées par une méthode qui limitait l'analyse à 30 ADN différents. Des biopuces, nommées ici neuropuces,

ont remplacé cette méthode : ce sont des plaques de verre d'environ un centimètre carré sur lesquelles sont greffés 96 fragments d'ADN parfaitement connus (on connaît également la position de chacun d'eux sur la puce), par exemple, des gènes de neuropeptides, d'enzymes de synthèse de neuromédiateurs, ou encore, de sous-unités de récepteurs. Parmi les différentes méthodes de fixation, les neurobiologistes ont choisi d'utiliser une «colle moléculaire» de polylysine (la lysine est l'un des acides aminés qui constituent les protéines) ; les molécules d'ADN s'y fixent. Synthétisés à partir des ARN messagers et amplifiés par PCR, les ADN à analyser sont marqués par des molécules fluorescentes. Les ADN libres ainsi marqués sont déposés sur une neuropuce ; ils se fixent sur les fragments d'ADN qui leurs sont complémentaires ; l'excès des ADN non fixés est ensuite éliminé par un lavage et on observe la fluorescence de la puce. Les régions fluorescentes indiquent la fixation d'un fragment d'ADN complémentaire. De plus, l'intensité de cette fluorescence rend compte de la quantité d'ARN messagers.

Grâce aux neuropuces, J. Rossier a montré que les interneurons (des neurones à axones courts qui véhiculent l'information sur de petites distances) du néocortex (les couches extérieures du cerveau), dont le signal électrique est irrégulier, sécrètent un neuromédiateur nommé peptide vasomoteur intestinal ; on savait que ce peptide est un régulateur du métabolisme et du flux sanguin intestinal et l'on a découvert qu'il a une action compa-

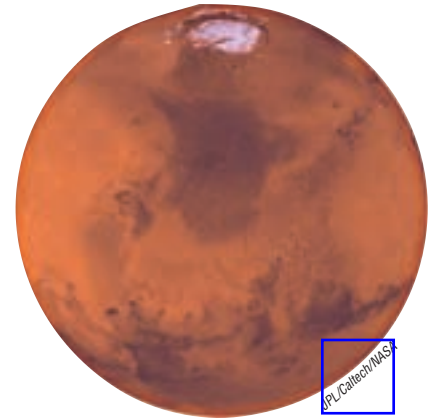
table dans le cerveau.

Les pharmacologues supposent maintenant que le fonctionnement de ces interneurons serait altéré dans plusieurs maladies neuropsychiatriques. Grâce aux biopuces, utilisées également pour l'identification rapide de virus ou de bactéries pathogènes, les analyses moléculaires qui requéraient plusieurs jours et manquaient de précision s'effectuent aujourd'hui en quelques heures et sont plus fiables.



Les ARN messagers du cerveau d'un rat ont été recopiés en ADN et amplifiés par PCR. Le produit de l'amplification a été rendu fluorescent et déposé sur une lame de verre où sont attachés des fragments de 96 gènes de la neurotransmission. Après lavage, la fixation des ADN est révélée par la fluorescence. L'intensité de celle-ci est visualisable arbitrairement suivant l'échelle des couleurs de l'arc-en-ciel : bleu pour les gènes faiblement transcrits en ARN, et par ordre croissant, vert, jaune, rouge et blanc pour les gènes les plus fortement exprimés.

Pourquoi aller sur Mars?



GLENN ZORPETTE

L'objectif principal des missions sur Mars est la recherche de la vie. Cet objectif justifie-t-il l'envoi d'une mission habitée?

L'exploration du Globe a duré des siècles, des premiers périples méditerranéens jusqu'aux explorations arctiques et antarctiques, au début du XX^e siècle, en passant par les voyages de Christophe Colomb. Ce dernier partit vers l'Ouest à la recherche de meilleures routes commerciales avec l'Orient, mais il voulait aussi montrer la grandeur de l'Espagne. De même, la conquête de la Lune joua un rôle sym-

bolique important lors de la guerre froide. Si les grandes explorations ont ainsi mêlé les intérêts commerciaux, politiques et militaires, les explorateurs ont toujours contribué aux sciences (biologie animale ou végétale, ou géologie). Ainsi, notre compréhension de l'histoire géologique de la Lune résulte pour une grande partie des missions *Apollo*.

Aujourd'hui, Mars est une nouvelle *terra incognita*. Les perspectives d'un

gain financier à court terme étant douteuses, la guerre froide reculant dans les mémoires et la coopération internationale étant nécessaire aux grands projets spatiaux, d'autres impératifs que le profit ou le nationalisme seront nécessaires pour que les hommes impriment leurs pas sur la surface de la planète rouge. La science, et elle seule, sera-t-elle enfin le moteur de l'exploration?



Cette question en amène d'autres : sur Mars, pour quelles expériences les êtres humains sont-ils indispensables ? Ces expériences fourniraient-elles des résultats qui justifieraient l'envoi d'êtres humains dans l'espace interplanétaire ?

De l'eau et des fossiles

Avec Mars, les enjeux scientifiques sont considérables. La question de l'existence de vie sur Mars ou celle d'une vie éteinte ont été ravivées par des observations des dernières missions : de l'eau liquide a probablement coulé en abondance sur la planète rouge, et des fossiles de bactéries auraient été emportés jusqu'à la Terre dans une météorite martienne. Une indication claire de vie, passée ou présente, sur Mars aiderait à comprendre dans quelles conditions la vie peut apparaître ; si l'on établissait qu'elle est apparue indépendamment sur la Terre et sur Mars, les exobiologistes seraient conduits à penser que la vie existe ailleurs dans l'Univers.

Pourquoi penser que Mars avait de l'eau liquide à sa surface ? En 1999, la sonde *Mars Global Surveyor*, en orbite autour de la planète rouge depuis 1997,

a photographié un chenal qui aurait été creusé par l'érosion de l'eau durant des milliers d'années. Cette découverte fait suite au succès de la petite sonde robotisée *Mars Pathfinder*, qui se posa sur la planète en juillet 1997.

Cette dernière semblait montrer que la NASA avait raison de changer sa stratégie, en abandonnant les missions ambitieuses pour des missions plus nombreuses, plus simples et moins chères (*cheaper, faster, better*). Malheureusement l'envoi des deux engins suivants échoua. La perte de *Mars Climate Orbiter* et de *Mars Polar Lander* ont rappelé amèrement que même des missions robotisées relativement simples peuvent échouer.

Bien que la NASA n'ait pas de mandat officiel pour envoyer des astronautes sur Mars, certaines des missions robotisées prévues devaient effectuer des expériences qui prépareront des missions habitées. Après le succès de *Mars Pathfinder*, des équipes de la NASA évoquaient une mission habitée vers 2020. Un tel calendrier paraît aujourd'hui optimiste.

Plutôt que de s'apitoyer sur les récents échecs, les partisans de l'ex-

ploration humaine se fondent sur les analyses controversées des météorites martiennes et sur les résultats étonnants de *Mars Global Surveyor* pour envisager les découvertes et les progrès qu'accompliraient des scientifiques sur Mars. Selon Robert Zubrin, par exemple, on ne résoudra la question de l'évolution de la vie sur Mars que si des hommes s'y rendent, car la recherche de fossiles requiert des capacités qui dépassent celles des robots motorisés actuels : qui mieux qu'un être humain explorera de grandes surfaces, piochera, échantillonnera des roches, analysera les différentes couches géologiques et brossera la poussière pour faire finalement apparaître le fossile convoité ?

L'exploration complète de Mars à l'aide de robots demanderait des décennies, voire des siècles : de nombreuses missions robotisées et, donc, de lancements seraient nécessaires ; or, en augmentant le nombre de lancements, on augmente considérablement le temps que prendrait un programme robotisé, car on ne peut lancer de fusées vers Mars que tous les 26 mois terrestres, lorsque les planètes sont situées

1. LES PREMIERS PAS SUR MARS seront bien plus difficiles que sur la Lune si la surface de la planète rouge est balayée par des tempêtes de poussières. On envisage aujourd'hui un module de descente (à gauche) distinct du véhicule de remontée (à l'arrière-plan), qui reconduira les astronautes vers le vaisseau orbital, pour le voyage de retour.

de manière que le trajet dure moins d'un an. Certains doutent qu'un programme conservera l'intérêt du public et des élus s'il dure des décennies.

D'autres partisans des vols habités les justifient en observant que la vie est probablement sous la surface de Mars : l'atmosphère contient des traces d'un composé fortement oxydant, peut-être du peroxyde d'hydrogène, de sorte que les couches supérieures du sol martien sont dépourvues de matière organique. On devra rechercher les micro-organismes en profondeur, là où la matière organique est protégée du composé oxydant et des rayonnements ultraviolets du Soleil. Les prochaines sondes emporteront de quoi forer plusieurs centimètres de roche ou creuser à quelques mètres de profondeur

dans le sol. Toutefois, si la vie n'apparaît pas à ces faibles profondeurs, on ne pourra clore le dossier de la vie sur Mars avant d'avoir creusé à plusieurs centaines de mètres, voire à quelques kilomètres, sous la surface. Comment automatiser de tels forages ?

La communauté scientifique reconnaît généralement qu'une mission habitée sur Mars ferait progresser la planétologie, mais on débat de l'intérêt d'une telle mission par rapport à des missions robotisées. La comparaison est difficile, parce que les techniques évoluent rapidement. Quelles seront les capacités des robots dans cinq ou dix ans, par exemple ? Aujourd'hui, les robots disponibles ne peuvent pas chercher les fossiles de micro-organismes. Le petit robot *Sojourner*, apporté par *Mars Pathfinder*, n'a voyagé que 106 mètres autour du site d'atterrissage avant que *Mars Pathfinder* n'arrête de relayer les communications, et les meilleurs micro-processeurs de ce genre de robot n'ont pas même l'intelligence d'une fourmi.

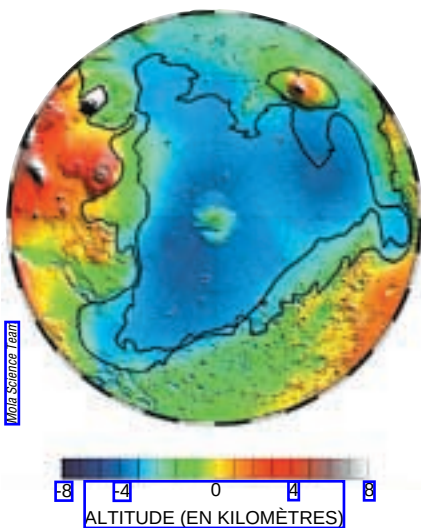
La télécommande de robots mobiles, munis de capteurs et de manipulateurs, semblait initialement intéressante, mais le délai de communication aller et retour avec Mars est de 40 minutes, ce qui semble insuffisant pour un travail de terrain sérieux.

Certes, les missions spatiales habitées sont coûteuses : envoyer des êtres humains sur Mars coûterait 130 à

360 milliards de francs. Toutefois, selon R. Zubrin, même si les missions habitées sont près de dix fois plus chères que les missions automatiques, elles sont plus rentables : une mission habitée ramènerait 100 fois plus d'échantillons ramassés sur une superficie 10 000 fois supérieure.

Évidemment, cette idée des vols habités ne fait pas l'unanimité : Arden Albee, de l'Institut de technologie de Californie, estime que l'envoi d'humains est difficilement justifiable, et une étude effectuée en 1986 par le Comité pour l'exploration du Système solaire de la NASA a établi qu'une mission robotisée aurait pu collecter tous les échantillons géologiques lunaires ramassés lors de la mission *Apollo 15*. En un jour de cette mission, les astronautes David Scott et James Irwin ont conduit un véhicule sur 11,2 kilomètres, prélevant des échantillons en cinq points ; ils ont ramassé 45 roches, 17 échantillons de sol meuble et huit carottes de sol. En 155 jours, un robot automobile aurait effectué le même travail. Pendant la majeure partie du temps, le robot serait resté immobile tandis que les experts, sur Terre, auraient planifié la manœuvre suivante. Le prélèvement d'échantillons en lui-même aurait pris 70 jours, durant lesquels le robot n'aurait roulé que 31 heures.

Toutefois Mars n'est pas la Lune. L'énorme territoire de la planète rouge, avec ses formations géologiques éton-



POLE NORD

POLE SUD

2. UN OCEAN a peut-être recouvert le pôle Nord de Mars jusqu'à une profondeur moyenne de quelques centaines de mètres. Les lignes noires, sur l'image en haut à gauche, indiquent les rivages possibles, et l'échelle de couleur montre l'altitude en kilomètres.

Une projection des altitudes le long du méridien 0 degré de longitude (*ci-dessus*) indique que le pôle Sud de Mars est environ six kilomètres plus haut que le pôle Nord, d'où la possibilité pour l'eau de s'écouler du Sud vers le Nord.



3. CETTE IMAGE très précise de la surface de Mars a été prise le 1^{er} janvier 2000. Elle montre des structures inhabituelles formées par des mécanismes inconnus. Nommée *Nilosyrtis Mensae*, la zone représentée est dans l'hémisphère Nord martien.

nantes et son climat inhospitalier, sera vraisemblablement exploré par une combinaison d'hommes et de machines. Pascal Lee et ses collègues du Centre Ames de la NASA préparent cette exploration en étudiant le cratère Haughton, dans le Nord canadien. Dans ce désert glacé, ils testent les techniques qui seront utilisées par les futurs explorateurs de la planète rouge. Dans leur quête d'échantillons, P. Lee et ses collègues ont parcouru des centaines de kilomètres et gravi d'innombrables affleurements, dont la plupart n'auraient pu être franchis par un robot non spécialisé.

Coopération pour Mars

L'exploration et la découverte sont deux processus itératifs dont seul l'adaptabilité humaine et la mobilité viendront à bout en un temps raisonnable. Cependant, des machines semi-autonomes seront nécessaires pour effectuer les tâches trop laborieuses ou dangereuses pour les hommes, comme les reconnaissances aériennes, la construction de dépôts, de caches et d'abris pour des longues excursions sur le terrain, et le transport et la conservation des grandes quantités d'échantillons que les géologues ramasseront.

Qui se chargera d'envoyer des hommes sur Mars? Le nationalisme n'est pas un moteur suffisant dans ce cas, car l'envoi d'hommes sur Mars est au-delà des possibilités d'un seul pays. En revanche, on peut imaginer qu'un groupe de nations industrialisées cherchera la gloire en allant sur Mars. Ainsi l'exploration de l'espace profiterait d'un «extranationalisme».

On peut également imaginer que des grandes entreprises contribuent à ce genre de projet, afin de se faire de la publicité, de bénéficier des avancées techniques obtenues au cours du projet ou de vendre les droits de retransmission télévisuelle. De nombreuses aventures humaines, des Jeux olympiques au récent tour du monde en ballon, ont bénéficié du soutien d'entreprises privées. Un projet de 350 milliards de francs éclipserait tous les autres. Est-ce trop cher payer pour laisser une marque indélébile dans l'histoire.

Glenn ZORPETTE est journaliste à la revue *Scientific American*.

Comment aller sur Mars

GEORGE MUSSER • MARK ALPERT

Les solutions techniques pour aller sur Mars sont nombreuses. La difficulté sera de choisir la meilleure.

La difficulté d'un voyage vers Mars a de quoi décourager les plus entreprenants : la planète ne s'approche jamais à moins de 80 millions de kilomètres de la nôtre, de sorte qu'un aller et retour prendrait plusieurs années. Les ingénieurs ont des solutions pour envoyer des hommes sur la planète rouge et les faire ensuite revenir sains et saufs, mais le coût d'un tel projet est considérable.

Le coût d'une mission sur Mars dépend essentiellement de la masse du véhicule spatial, car un engin spatial léger nécessite moins de carburant. Ce dernier ne coûte pas cher en lui-même : c'est le coût du lancement en orbite terrestre qui est proportionnel à la masse du véhicule, laquelle est à 80 pour cent constituée de carburant. Tous les projets de missions vers Mars se sont souciés de minimiser la masse du véhicule sans compromettre la sécurité ou l'intérêt scientifique.

En 1952, Wernher von Braun envisageait la construction d'une armada de véhicules spatiaux propulsés par des fusées chimiques classiques ; il estimait que la masse totale au décollage atteindrait 37 200 tonnes. Ne serait-ce que placer une telle flotte en orbite terrestre coûterait des milliers de milliards de francs. Depuis, les ingénieurs ont imaginé des allègements par l'utilisation de fusées nucléaires ou électromagnétiques à meilleur rendement, par la réduction du nombre d'astronautes, par la réduction du niveau de redondance des équipements et par la fabrication du carburant de retour sur Mars (voir la figure 1).

Aujourd'hui, la mission la plus simple, *Mars Direct*, coûterait 100 milliards de francs en frais initiaux, répartis sur une décennie, plus dix milliards de francs par mission (voir *Un direct pour Mars*, page 38). Le projet de la NASA, nommé «mission de référence», reprend plusieurs idées de *Mars Direct*, mais coûte environ deux fois plus cher, avec une sécurité accrue et un équipage plus nombreux (six astronautes au lieu de quatre).

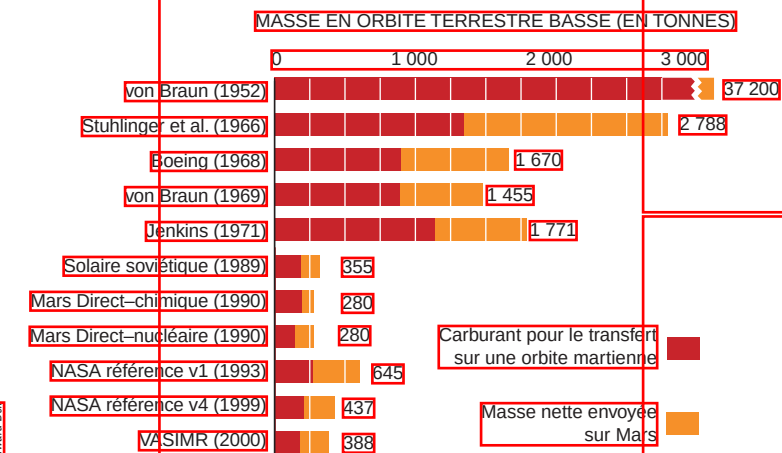
Ce projet envisage trois engins spatiaux : un module automatique de

descendraient sur la surface, y resteraient 500 jours, puis repartiraient avec le véhicule ascensionnel. Le module de transfert, qui aurait attendu en orbite, les ramènerait sur la Terre. Tous les 26 mois partirait un nouveau trio d'engins spatiaux, afin de construire finalement une base permanente.

Un tel programme coûterait moins cher que la Station spatiale internationale ou que le programme *Apollo*. Toutefois, la NASA ayant la réputation de dépasser ses budgets, de nombreux partisans des missions vers Mars se sont réunis dans diverses organisations, comme l'Association Planète Mars (*Mars Society*), afin de mettre au point d'autres projets.

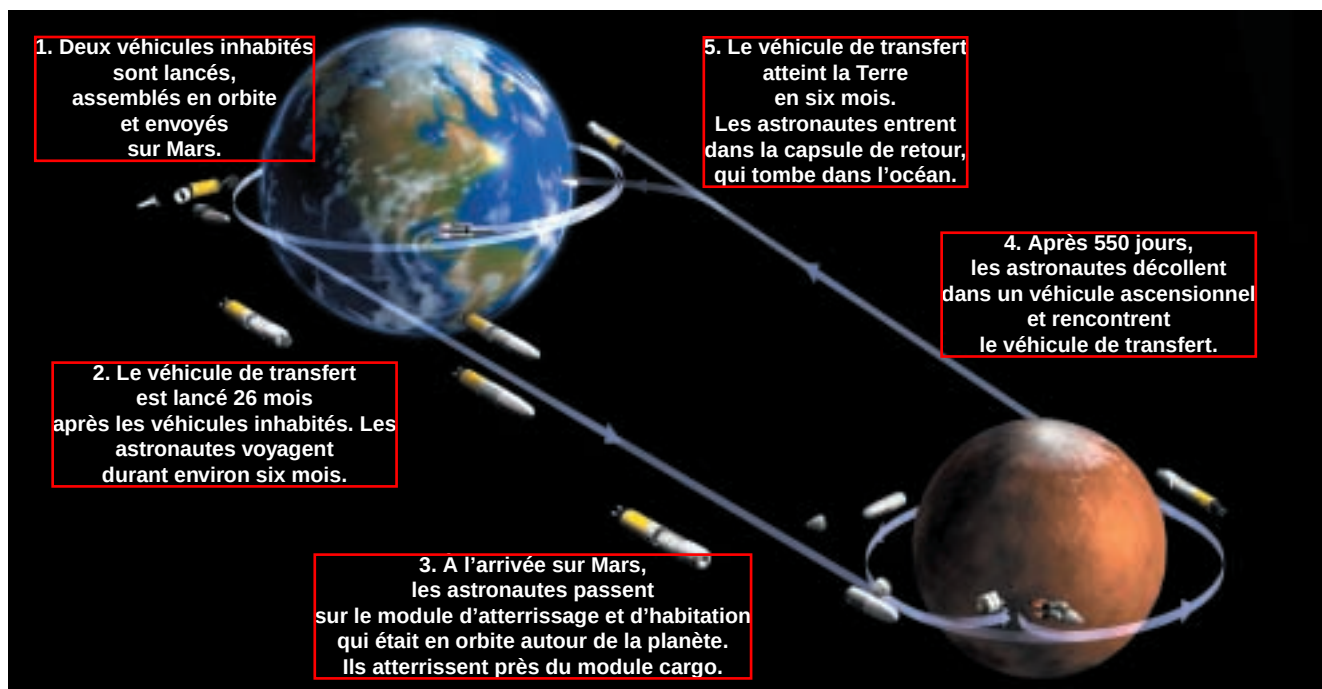
Le plus avancé est celui qui émane de *ThinkMars*, un groupe d'étudiants de l'Institut de technologie du Massachusetts et de l'Université Harvard. Ce groupe propose la création d'une société à but lucratif pour gérer le projet Mars, en sous-traitant les diverses tâches à des sociétés privées et aux centres de recherche de la NASA. Les gouvernements de différents pays achèteraient des places ou de l'espace pour des expériences à prix réduit. Le reste du financement proviendrait de la vente de publicité, de droits de retransmission télévisuelle et de brevets issus des recherches.

Après avoir montré qu'une mission habitée est techniquement faisable, les partisans de ce type d'opérations cherchent aujourd'hui à convaincre les contribuables, les élus et les industriels.



1. LA MASSE DES ENGINS des missions proposées pour atteindre Mars, déterminante pour le coût, a progressivement diminué. Chaque estimation de la masse d'une mission, donnée au départ pour une orbite terrestre basse, inclut l'équipage et les vols nécessaires pour une équipe d'astronautes (véhicule de l'équipage, cargo, carburant, etc.).

matériel qui dépose un véhicule ascensionnel et une usine de carburant à la surface de Mars ; un module habitable inoccupé, qui se place en orbite martienne ; et un module de transfert de l'équipage, qui, une fois les deux premiers arrivés à destination, se mettra en route lorsque Mars et la Terre seront à nouveau alignés, 26 mois après les premiers lancements. Le module de transfert emmènerait les astronautes vers Mars et s'amarrerait au module habitable. Les astronautes changeraient de vaisseau,



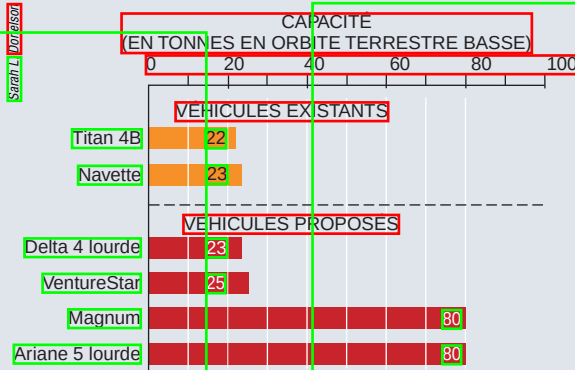
2. LA MISSION de référence de la NASA.

Lancement et assemblage

Toute expédition pour Mars commence par le lancement du véhicule spatial en orbite terrestre basse (à une altitude de 200 à 500 kilomètres). Le problème principal est que tout engin habité à propulsion chimique doit avoir une quantité énorme de carburant pour aller jusqu'à Mars, de sorte qu'il sera extrêmement lourd : au moins 130 tonnes, peut-être même le double. Aucun lanceur spatial actuel ne place une telle masse en orbite. Les navettes spatiales et les fusées de grande capacité, tel *Titan 4B*, emportent des charges utiles de 25 tonnes au maximum. De surcroît, avec des coûts actuels de lancement par la navette qui atteignent 100 millions de francs par tonne, le coût d'un engin spatial pour Mars est prohibitif.

Les sociétés aérospatiales mettent au point des fusées plus rentables et des lanceurs réutilisables, mais aucun n'envairait en orbite une charge utile de 130 tonnes. La fusée *Saturne 5* de l'époque d'*Apollo* ferait l'affaire, tout comme la fusée russe *Energia*, mais les lignes de fabrication de ces lanceurs ont été démantelées. Selon toute vraisemblance, le véhicule spatial martien devra être lancé par étapes, puis assemblé en orbite, de préférence grâce à des manœuvres d'amarage commandées à partir de la Terre. Une navette spatiale transporterait ensuite l'équipage jusqu'au véhicule assemblé.

Afin de minimiser le nombre de lancements et de rendez-vous en orbite, les ingénieurs de la NASA ont conçu une fusée, nommée *Magnum*, qui emmènerait 80 tonnes en orbite. Ainsi, deux lancements suffiraient pour le déploiement du véhicule pour Mars (le diagramme ci-contre compare les lanceurs). La fusée *Magnum* utiliserait



LES LANCEURS ACTUELS sont insuffisants pour assurer une mission humaine sur Mars. Propulser un vaisseau de 130 tonnes en orbite terrestre nécessiterait six lancements d'*Ariane 5*, de *Titan 4B*, d'une navette spatiale, de *Delta 4 Heavy* ou de *VentureStar*, mais seulement deux lancements de la fusée *Magnum* ou d'*Ariane 5* version lourde.

les mêmes pas de tir et les mêmes fusées d'appoint à poudre que les navettes spatiales. Ces dernières pourraient être attachées à une nouvelle fusée bi-étage équipée de trois moteurs RD0120, de conception russe. La fusée *Magnum* emporterait une charge utile de 28 mètres de long, et le revêtement de l'étage supérieur de la fusée servirait également d'écran thermique pour le véhicule martien. La réutilisation de matériel existant réduirait le coût de cette fusée : environ 12 milliards de francs pour la conception et 12 millions de francs par tonne de charge utile à chaque lancement (des coûts dix fois inférieurs à ceux de la navette spatiale).

Par ailleurs, on peut construire un lanceur encore plus puissant à partir des composantes de la navette spatiale. *Ares*, ce nouveau lanceur, utiliserait un moteur d'étage supérieur à forte poussée pour placer le véhicule habité directement sur une trajectoire vers Mars.

En Europe, le Centre national d'études spatiales a étudié en 1991 une version lourde du lanceur *Ariane 5* : quatre boosters au lieu de deux, cinq moteurs SNECMA *Vulcain* au lieu d'un sur le corps central, un deuxième étage cryotechnique équipé d'un moteur *Vulcain*. Cette fusée serait capable de mettre plus de 80 tonnes en orbite basse et d'envoyer 26 tonnes vers Mars. Ce lanceur a plutôt été dimensionné pour des opérations lunaires, mais il entre dans la catégorie des lanceurs lourds susceptibles d'utilisation pour les opérations martiennes. Sa charge utile pourrait être nettement plus élevée, compte tenu des améliorations qui seront apportées aux éléments du lanceur *Ariane 5* d'ici là.

Les systèmes de propulsion

Comment propulser un véhicule spatial habité, d'une orbite terrestre jusqu'à Mars? Les différents systèmes proposés ont chacun leurs avantages et leurs inconvénients. Le principal compromis technique est entre la poussée de la fusée et son rendement énergétique. Les systèmes à forte poussée communiquent une accélération supérieure, mais ils consomment en général plus de carburant. Les systèmes à faible poussée prennent plus lentement de la vitesse, mais ils consomment moins.

Les deux systèmes sont complémentaires : les fusées à forte poussée transporteraient rapidement les astronautes, tandis que les systèmes à faible poussée convoieraient plus lentement du matériel ou des modules d'habitation vides.

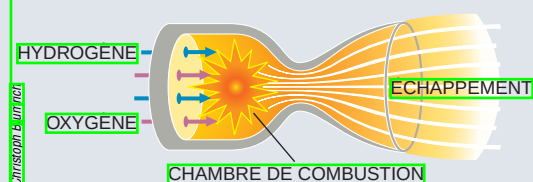
CODE DE COULEURS

→	CARBURANT
→	COURANT ÉLECTRIQUE
→	CHAMP MAGNÉTIQUE
→	OXYGÈNE

LA PROPULSION CHIMIQUE

La propulsion chimique est une technique éprouvée : la combustion de l'hydrogène et de l'oxygène produit des gaz dont la détente pousse la fusée. Elle engendre une poussée supérieure à celle de la plupart des autres techniques, mais avec un rendement inférieur. Les fusées chimiques nécessiteraient des quantités prodigieuses de carburant pour propulser un véhicule habité vers Mars. L'un des projets envisagés nécessite, en orbite terrestre basse,

Poussée : 110 000 newtons
Vitesse d'éjection des gaz : 4,5 kilomètres par seconde
Temps de combustion spécifique : 21 minutes
Fraction de masse : 55 pour cent

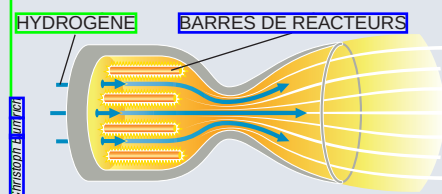


un engin de 233 tonnes, dont 166 tonnes d'hydrogène et d'oxygène liquides. Ses sept moteurs RL-10 (un moteur classique utilisé sur de nombreuses fusées américaines) seraient disposés en trois étages de propulsion. Le premier étage enverrait le véhicule en orbite elliptique haute autour de la Terre ; le deuxième placerait le véhicule sur une trajectoire vers Mars ; et le troisième le ferait retourner vers la Terre à la fin de la mission. Chaque étage serait mis à feu pendant quelques minutes seulement, puis serait largué.

LA PROPULSION THERMONUCLÉAIRE

Dans les années 1960, le gouvernement américain a construit et testé au sol des fusées thermonucléaires dans le cadre du programme *Rover/NERVA*. Dans ces moteurs, un flot d'hydrogène liquide traverse un réacteur à cœur nucléaire solide, où le gaz est chauffé à plus de 2 500 °C avant d'être éjecté à grande vitesse par la tuyère de la fusée. La propulsion nucléaire fournit deux fois plus de quantité

Poussée : 67 000 newtons
Vitesse d'éjection des gaz : 9 kilomètres par seconde
Temps de combustion spécifique : 27 minutes
Fraction de masse : 32 pour cent

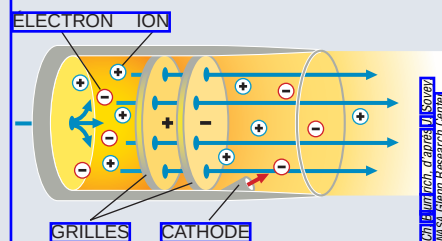


de mouvement par kilogramme de carburant que les fusées chimiques les plus performantes, et les réacteurs produisent de l'électricité pour le véhicule spatial. Un vaisseau habité de 170 tonnes, avec trois moteurs nucléaires et environ 90 tonnes d'hydrogène liquide, atteindrait Mars en six ou sept mois. Toutefois le public s'oppose à l'envoi dans l'espace d'un réacteur nucléaire : plusieurs systèmes de propulsion qui utilisent également des réacteurs nucléaires ont été aujourd'hui écartés.

LA PROPULSION IONIQUE

Conçue dans les années 1950, la propulsion ionique est l'une des techniques qui utilisent les champs électriques (plutôt que la chaleur) pour éjecter le gaz propulseur. Un gaz, comme le césium ou le xénon, passe dans une chambre où il est ionisé par un canon à électrons semblable à celui des tubes cathodiques des téléviseurs. Une tension électrique appliquée entre deux grilles de métal extrait les ions positifs, qui traversent la grille et sont éjectés dans l'espace.

Poussée : 30 newtons
Vitesse d'éjection des gaz : 30 kilomètres par seconde
Temps de combustion spécifique : 79 jours
Fraction de masse : 22 pour cent

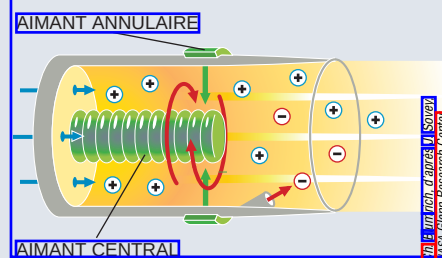


Simultanément une cathode, à l'arrière du moteur, évacue les électrons dans le faisceau d'ions, de manière que le véhicule spatial n'accumule pas des charges négatives. En 1998, la sonde *Deep Space 1* était équipée d'un tel moteur. Celui-ci a consommé 2,5 kilowatts d'énergie solaire et produit une poussée faible (0,1 newton, c'est-à-dire la force d'un souffle humain), mais longue (plusieurs mois). Malheureusement, les grilles, qui à la fois accélèrent et retiennent les particules, ne peuvent être dimensionnées pour des moteurs de puissance voisine du mégawatt, requis pour les missions habitées vers Mars. De surcroît, un système de propulsion ionique nécessiterait de l'énergie produite par des réacteurs nucléaires, car des panneaux solaires de plus de 100 kilowatts seraient probablement difficiles à manier.

LA PROPULSION A EFFET HALL

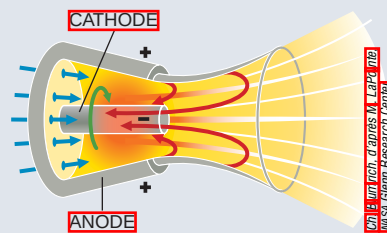
Comme les systèmes de propulsion ionique, les moteurs à effet Hall utilisent un champ électrique pour accélérer des particules chargées positivement (en général, des noyaux de xénon). Le moteur crée différemment le champ électrique : un anneau d'aimants engendre d'abord un champ magnétique radial, qui fait circuler les ions autour de lui. Ce déplacement crée alors un champ électrique axial, qui assure l'éjection. Contrairement à la propulsion ionique classique, ce système ne comporte pas de grille et pourrait être agrandi plus facilement. Le rendement est inférieur, mais un second étage de propulsion l'améliorerait. Des petits moteurs-fusées à effet Hall volent sur des satellites russes depuis le début des années 1970 et la technique a récemment été adoptée par les États-Unis. Les derniers systèmes construits par les Russes consomment environ cinq kilowatts et engendrent une poussée de 0,2 newton. De son côté, l'Europe dispose du moteur SNECMA PPS1350 d'une poussée de 0,08 newton.

Poussée : 30 newtons
Vitesse d'éjection des gaz : 15 kilomètres par seconde
Temps de combustion spécifique : 90 jours
Fraction de masse : 38 pour cent



LA PROPULSION MAGNETOHYDRODYNAMIQUE

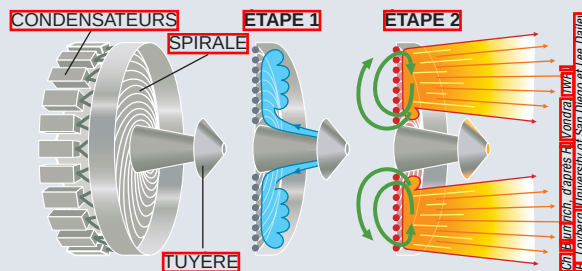
Ces moteurs accélèrent des particules chargées en utilisant des champs magnétiques plutôt que des champs électriques. Le système est composé d'une anode creuse, avec tige centrale formant cathode. Une différence de potentiel appliquée entre les deux électrodes ionise le gaz propulseur. Cette ionisation engendre un puissant courant électrique radial, qui s'écoule à travers le gaz et le long de la cathode. Ce courant engendre un champ magnétique circulaire, qui interagit avec le courant passant dans le gaz et accélère les particules dans une direction perpendiculaire aux deux, c'est-à-dire axiale. Le gaz propulseur peut être de l'argon, du lithium ou de l'hydrogène, par ordre croissant de rendement. Après s'être intéressée par intermittence à ce système pendant des décennies, la NASA a repris les travaux sur la propulsion magnétohydrodynamique en 1999. À la suite des recherches menées à l'Université de Princeton et dans des centres russes, japonais et allemands, la NASA a construit un prototype de un mégawatt, où le courant circule par impulsions de deux millisecondes.



Poussée : 100 newtons
Vitesse d'éjection des gaz : 20 à 100 kilomètres par seconde
Temps de combustion spécifique : 21 à 25 jours
Fraction de masse : 6,7 à 31 pour cent

LES MOTEURS À INDUCTION PULSÉE

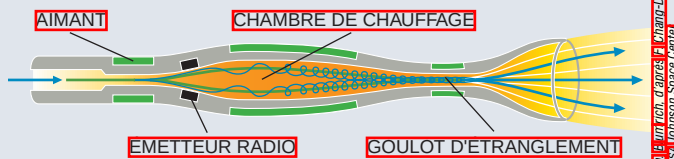
Le moteur à induction pulsée, qui retrouve les faveurs de la NASA, se fonde sur la création rapide de champs magnétiques et électriques perpendiculaires. Une tuyère éjecte d'abord une bouffée de gaz (en général, de l'argon), qui s'étale contre une spirale de fil électrique d'environ un mètre de diamètre. Une batterie de condensateurs produit alors, dans la spirale, une décharge de courant pendant environ dix millisecondes. Le champ magnétique radial créé par l'impulsion engendre un champ électrique circulaire dans le gaz, qu'il ionise et dont il accélère les particules dans la direction opposée à celle de l'impulsion électrique initiale. Comme leur déplacement est perpendiculaire au champ magnétique, ces particules sont éjectées dans l'espace. Contrairement à d'autres propulseurs électromagnétiques, ce système ne requiert pas d'électrodes, qui ont tendance à s'user, et l'on augmente la puissance en augmentant la fréquence des impulsions. On obtiendrait une puissance de un mégawatt, en émettant les impulsions 200 fois par seconde.



Poussée : 20 newtons
Vitesse d'éjection des gaz : 50 kilomètres par seconde
Temps de combustion spécifique : 110 jours
Fraction de masse : 14 pour cent

VASIMR

Le VASIMR (*Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket*, ou «fusée à magnétoplasma à impulsions spécifiques variables») comble la lacune entre les systèmes à forte et à faible poussée. De l'hydrogène est d'abord ionisé par des ondes radio, puis guidé vers une chambre centrale où l'on fait régner un champ magnétique. Là, les particules longent les lignes de champ magnétique en tournant autour d'elles à une fréquence qui ne dépend que de leur charge électrique et de leur masse (la fréquence de Larmor). En bombardant les particules avec des ondes radio à la même fréquence, on les chauffe jusqu'à des températures de dix millions de degrés. Une tuyère magnétique transforme enfin le déplacement en spirale en déplacement axial, ce qui engendre la poussée. En réglant le chauffage et le convertisseur magnétique de sortie, le pilote commande la vitesse d'éjection. Le mécanisme est analogue à celui du levier de vitesse d'une voiture. En fermant l'étranglement de sortie, la fusée passe «en cinquième» : on réduit le nombre de particules excitées (et donc la poussée), mais on augmente leur température (et donc la vitesse d'éjection). L'ouverture de l'étranglement correspond à «la première» : poussée forte, mais rendement faible. Un véhicule spatial utiliserait une faible vitesse et un dispositif de chauffage pour quitter l'orbite terrestre, puis passerait en «cinquième» pour la croisière interplanétaire. La NASA prévoit un vol d'essai avec un système de dix kilowatts en 2004 ; les missions vers Mars nécessiteraient dix mégawatts.



Poussée :
Vitesse d'éjection des gaz :
Temps de combustion spécifique :
Fraction de masse :

«Première»
1 200 newtons
10 kilomètres par seconde
2,1 jours
46 pour cent

«Cinquième»
40 newtons
300 kilomètres par seconde
53 jours
2,4 pour cent

LES VOILES SOLAIRES

Les voiles solaires sont poussées par la faible pression de la lumière solaire. Pour transporter 25 tonnes en un an, de la Terre sur Mars, une voile devrait avoir une surface d'au moins quatre kilomètres carrés et une densité de un gramme par mètre carré. On fabrique aujourd'hui des fibres de carbone presque aussi fines qu'un cheveu, qui feraient ainsi des voiles très légères, mais comment déployer une structure aussi grande et aussi fragile ? En 1993, le Consortium spatial russe *Regatta* a déployé le miroir spatial *Znamya* de 300 mètres carrés, mais, lors d'un second essai en 1999, il s'est emmêlé. La NASA a récemment financé un concept similaire pour une «voile» magnétique qui capterait le vent solaire, les particules chargées émises par le Soleil, plutôt que la lumière solaire.

Poussée : 9 newtons par kilomètre carré (à la distance de la Terre au Soleil)
Vitesse d'éjection des gaz : pas de gaz
Temps de combustion spécifique : 58 jours

Quelle route prendre pour aller sur Mars?

Pour les fusées à forte poussée, la trajectoire la plus économique est l'orbite de transfert de Hohmann. Cette ellipse, tangente aux orbites de la Terre et de Mars, utilise au maximum le mouvement orbital des planètes pour accélérer le véhicule spatial. Celui-ci serait lancé lorsque Mars est en avant de la Terre d'un angle d'environ 45 degrés (ce qui se produit tous les 26 mois). Il quitterait la Terre et arriverait sur Mars de l'autre côté du Soleil par rapport à la position initiale de la Terre (voir la figure 3a). Une telle configuration des planètes forme ce que les astronomes nomment une conjonction. Pour revenir, les astronautes attendraient que Mars soit en avant de la Terre d'un angle de 75 degrés, placeraient leur véhicule sur un arc rentrant et laisseraient la Terre le rattraper.

Chaque étape nécessite deux phases d'accélération. À partir de la surface terrestre, une pointe de vitesse à 11,5 kilomètres par seconde per-

met au véhicule de se libérer de l'attraction terrestre et d'entrer en orbite de transfert. Une autre solution consiste à partir d'une orbite terrestre basse sur laquelle l'engin spatial tourne déjà à une vitesse élevée ; les moteurs doivent alors lui communiquer une vitesse additionnelle de 3,5 kilomètres par seconde. À l'approche de Mars, des rétrofusées ou un freinage dans l'atmosphère doivent ralentir le vaisseau spatial d'environ deux kilomètres par seconde pour entrer en orbite ou de 5,5 kilomètres par seconde pour se poser. Le retour est l'inverse de l'aller.

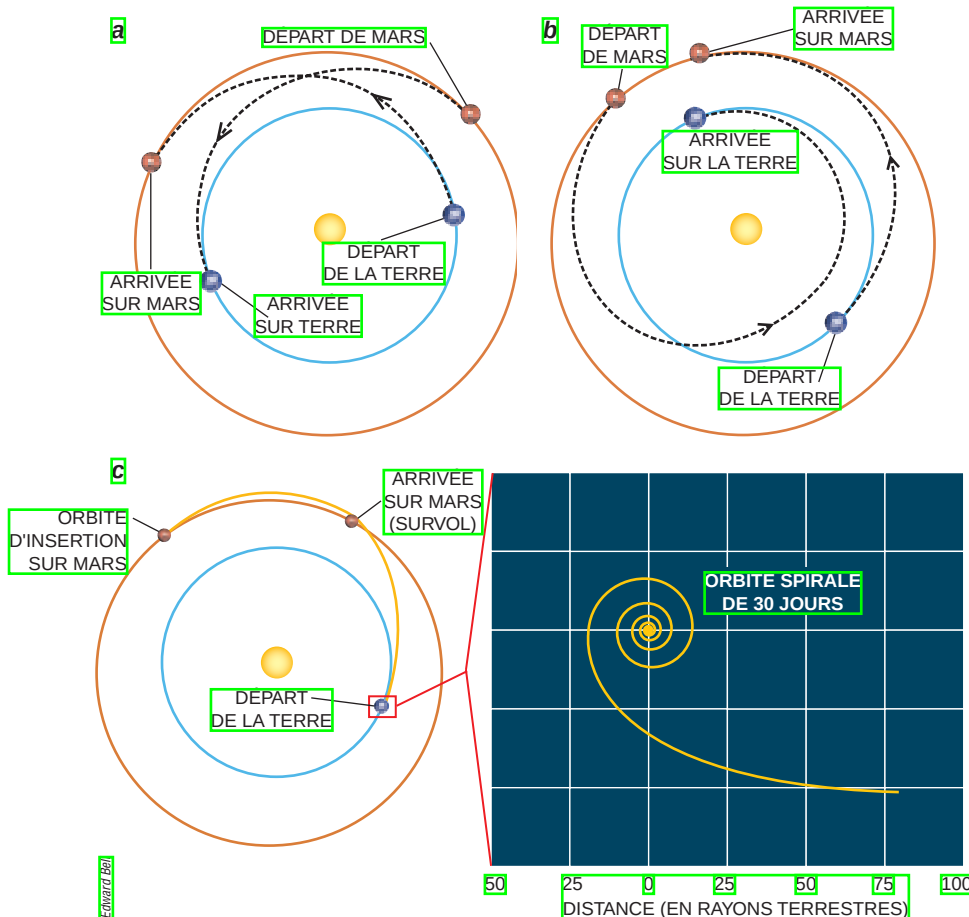
L'aller et le retour durerait un peu plus de deux ans et demi : 260 jours pour chaque étape de voyage interplanétaire et 460 jours de séjour sur Mars. Les principaux projets, tels *Mars Direct* et la mission de référence de la NASA, privilégient les trajectoires de type conjonction, mais abrègent le voyage en consommant un peu de carburant supplémentaire pendant le voyage. Une programmation minutieuse permet également d'assurer que le vaisseau retournera vers la Terre

de façon naturelle en cas de défaillance des moteurs.

Pour raccourcir le voyage, les ingénieurs de la NASA étudient les trajectoires de type opposition (voir la figure 3b), ainsi nommées parce que la Terre s'approche au plus près de Mars (une configuration que les astronomes nomment opposition) à un moment donné de la mission. Ces trajectoires requièrent une accélération supplémentaire, appliquée en cours de route. Le voyage durerait alors un an et demi : 220 jours pour l'aller, 30 jours de séjour sur Mars et 290 jours pour le retour. Le trajet retour piquerait vers le Soleil, utilisant éventuellement l'attraction gravitationnelle de Vénus, et reviendrait vers la Terre par derrière. La séquence pourrait être inversée de sorte que l'aller soit le voyage le plus long. Avec les fusées prévues, ces trajectoires imposent un trop long trajet pour un séjour aussi court, mais elles seraient intéressantes si l'on utilisait des fusées nucléaires très puissantes ou des navettes circulant en permanence entre les orbites de la Terre et de Mars sans jamais s'y arrêter.

Les fusées électriques à faible poussée économisent du carburant, mais elles ne sont pas assez puissantes pour libérer le véhicule de l'attraction terrestre en une seule impulsion. Elles doivent élargir lentement leur orbite, en tournant en spirale autour de la Terre, comme une voiture qui gravit une montagne. Elles atteindraient la vitesse de libération en un an, de sorte que l'équipage serait exposé trop longtemps au rayonnement des ceintures de Van Allen qui entourent la Terre. Ces fusées à faible poussée pourraient uniquement convoier du matériel.

Un moteur VASIMR ouvre d'autres possibilités. En restant en « première » (poussée élevée, mais faible rendement), il peut tourner en spirale pour quitter l'orbite terrestre en 30 jours. Le voyage interplanétaire durerait 85 jours supplémentaires. Durant la première moitié de ce voyage, la fusée fonctionnerait en « cinquième », puis, à mi-parcours, la fusée serait retournée et commencerait à ralentir en rétrogradant. À l'approche de Mars, une partie du vaisseau se détacherait pour se poser sur Mars, tandis que le reste (y compris le module pour le vol de retour) passerait à côté de la planète, continuerait à ralentir et entrerait en orbite martienne 131 jours plus tard (voir la figure 3c).



3. LES DIFFÉRENTES ORBITES pour se rendre sur Mars : les trajectoires de type conjonction (a), opposition (b) et insertion à faible poussée (c).

La sécurité des astronautes

Des êtres humains survivront-ils à l'aller et retour vers Mars? Les ingénieurs du Centre spatial de Houston améliorent sans cesse l'efficacité et la fiabilité des systèmes actuels. Sur la Terre, des volontaires ont passé jusqu'à trois mois dans une chambre close avec laquelle on testait de nouvelles techniques de recyclage de l'air et de l'eau. À des méthodes physiques et chimiques s'ajoutaient des méthodes de régénération biologique, telle la transformation des excréments solides en fertilisants pour faire pousser du blé, qui fournissait de l'oxygène et du pain.

Les ingénieurs cherchent également à minimiser les effets d'une exposition prolongée à l'impesanteur. Les astronautes séjournant plusieurs mois en orbite terrestre perdent une importante quantité de masse osseuse, et souffrent de divers autres maux

(voir *Le corps humain en impesanteur*, par Ronald White, *Pour la Science*, novembre 1998). On éviterait cette ostéoporose en faisant lentement tourner le vaisseau spatial durant son voyage interplanétaire.

Dans plusieurs projets, un câble ou une armature relie la capsule de l'équipage à un contrepoids, un étage de fusée qui a déjà brûlé, par exemple. Une rotation par minute au bout d'un rayon de 340 mètres de long assure une gravité de 0,38 g (0,38 fois la pesanteur terrestre), similaire à celle qui règne à la surface de Mars. En doublant la vitesse, on raccourcirait le bras d'un facteur quatre, mais on augmenterait la force de Coriolis, qui désorienterait les astronautes lors de leur déplacement à l'intérieur du vaisseau.

Cependant, la rotation du vaisseau complique les procédures de manœuvre et de communications ; aussi les médecins examinent-ils

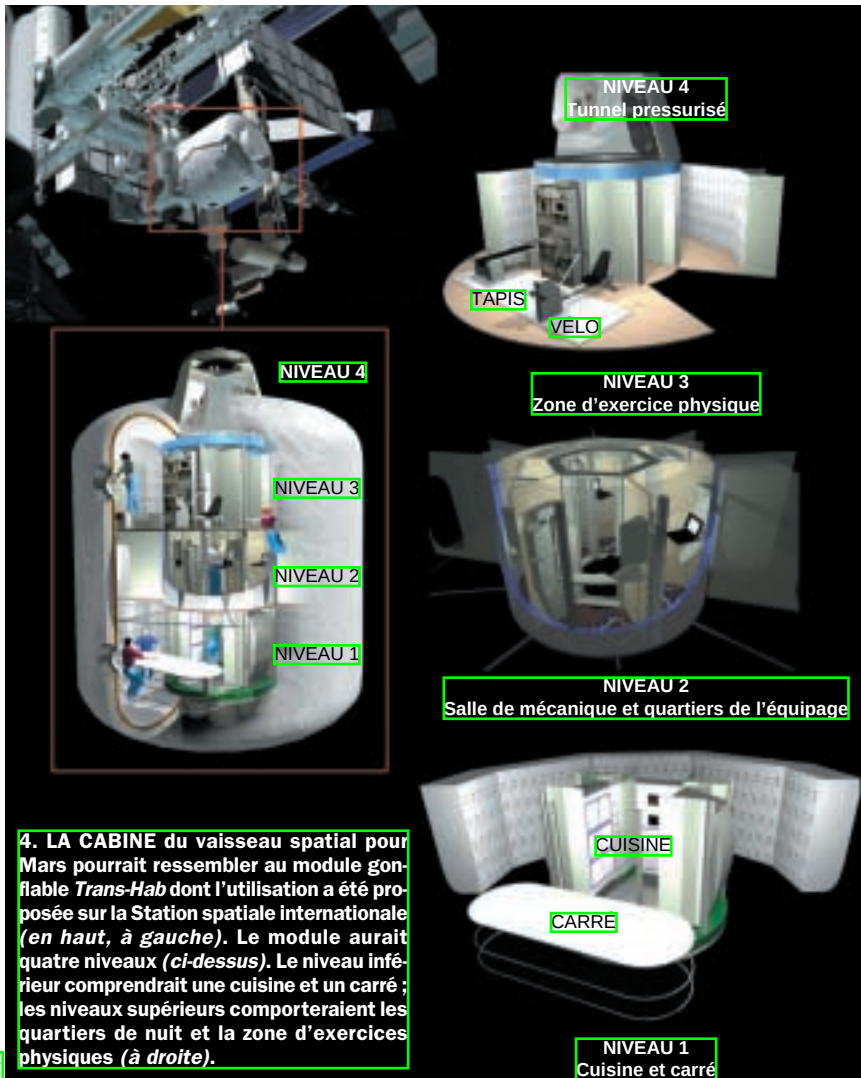
d'autres solutions, comme des exercices physiques spécifiques, des compléments alimentaires et l'utilisation de chaises centrifugeuses.

Ils se préoccupent également des rayonnements que recevrait l'équipage. Au rayonnement cosmique (les noyaux de haute énergie qui traversent en continu notre Galaxie) s'ajouterait celui des éruptions solaires, c'est-à-dire les intenses flux de protons qui sont périodiquement éjectés par le Soleil.

Le rayonnement cosmique a une énergie supérieure à celle des protons des éruptions solaires, de sorte qu'il est plus difficile à arrêter. À bord d'un vaisseau spatial, derrière une paroi d'aluminium de six centimètres d'épaisseur, la dose serait réduite de 20 pour cent par rapport à la même dose sans paroi. Les radiobiologistes estiment que cette exposition n'augmenterait le risque d'un décès par cancer dans les 30 ans que de quelques pour cent. Des pilules contenant des composés antioxydants pourraient diminuer ce risque.

Le rayonnement des éruptions solaires est dangereux, car il survient par jets imprévisibles qui déposent en une seule fois des doses mortelles sur la peau et les organes internes. Une éruption au moins a lieu tous les 11 ans, vers le maximum d'activité du cycle solaire, et des tempêtes un peu moins fortes sont enregistrées tous les deux ans. Les astronautes en orbite terrestre sont protégés par le champ magnétique de la Terre, qui piège et réfléchit les protons, mais pas les voyageurs qui seraient en route vers la Lune et vers Mars.

On sait arrêter les particules : les meilleurs écrans sont en matériaux riches en hydrogène, tel le polyéthylène ou l'eau ; des atomes plus lourds ne sont pas aussi efficaces, car les protons qui les heurtent déplacent leurs neutrons, ce qui déclenche une dangereuse cascade de rayonnement. Une épaisseur d'eau de dix centimètres réduirait la dose reçue lors des éruptions les plus fortes. Les concepteurs de missions ont proposé de créer un écran contre les tempêtes d'éruptions solaires sur le vaisseau en stockant l'eau destinée aux astronautes dans des poches qui entourent leurs quartiers de nuit. Grâce aux satellites d'observation du Soleil, on préviendrait les astronautes en cas d'éruption imminente.



4. LA CABINE du vaisseau spatial pour Mars pourrait ressembler au module gonflable *Trans-Hab* dont l'utilisation a été proposée sur la Station spatiale internationale (en haut, à gauche). Le module aurait quatre niveaux (ci-dessus). Le niveau inférieur comprendrait une cuisine et un carré ; les niveaux supérieurs comporteraient les quartiers de nuit et la zone d'exercices physiques (à droite).

L'environnement martien

Si les astronautes débarquent un jour sur Mars, ils percevront immédiatement les différences avec la Terre : la faible gravité de la Terre modifiera leur démarche. La cadence de la marche étant gouvernée par la gravité (comme la cadence d'un pendule), la vitesse de progression des astronautes sera environ 60 pour cent de celle qu'ils auraient sur Terre, tout en brûlant le même nombre de calories.

Dans l'atmosphère ténue de Mars (équivalente à celle de la Terre à une altitude de 35 kilomètres), la température et la pression varient vite et beaucoup, mais les caractéristiques météorologiques sont généralement uniformes. Bien que le vent atteigne 100 kilomètres par heure, la force qu'il exerce est faible, en raison de la faible densité de l'atmosphère. Les astronautes verraient du brouillard, du givre et de minces nuages bleus tôt le matin. Le ciel change de couleur selon le lieu et le moment de l'observation. Le lever et le coucher du Soleil sont bleus ; sinon, le ciel est couleur caramel. La lumière crée des illusions d'optique. En raison de la proportion variable de lumière solaire directe et d'une lueur indirecte des cieux, la couleur des roches diffère selon l'heure de la journée (voir ci-dessus).

Mars est ennuyeusement plate. Les Pics jumeaux, sur le site de *Mars Pathfinder*, ont à peine 50 mètres d'altitude et sont pourtant clairement visibles à un kilomètre de distance. Même le mont Olympe, la plus haute montagne du Système solaire, avec ses 22 kilomètres d'altitude, ne présente qu'une pente moyenne de quelques pour cent. La topographie devient plus intéressante sur les bords de *Valles Marineris*, une région de gorges et de canyons.

En raison de l'absence de relief, les astronautes verraient que Mars est plus petite que la Terre : la distance à l'horizon est proportionnelle à la racine carrée du rayon de la planète. Deux personnes de 1,70 mètre se verraient à une distance de sept kilomètres. L'horizon est également la limite des communications radio directes sur Mars, qui est dépourvue



5. YOGI, la roche la plus photographiée par la sonde *Mars Pathfinder* en 1997, a un aspect très différent le matin (à gauche) et l'après-midi (à droite), en raison des variations de la lumière martienne.

d'ionosphère. Les astronautes auraient besoin de satellites relais.

Les poussières martiennes pourraient gêner considérablement les astronautes qui séjourneraient sur la planète rouge. Mars est couverte de poussières d'environ deux micromètres de diamètre, comparables aux particules de la fumée de cigarette. La poussière collerait aux combinaisons spatiales, rayerait les visières des casques, provoquerait des courts-circuits électriques, décaperait les instruments et encrasserait les moteurs. Sur la Lune, également très poussiéreuse, les combinaisons fuyaient après deux jours d'utilisation. De surcroît, les analyses de la sonde *Viking* indiquent que les particules sont enrobées de produits chimiques corrosifs tel le peroxyde d'hydrogène. Bien qu'en faible concentration, ces composés détérioreraient lentement les joints en caoutchouc.

Si une petite proportion des particules est constituée de quartz, comme le laissent supposer les résultats de *Mars Pathfinder*, une autre menace pèse sur les astronautes : la silicose, une maladie pulmonaire qui tue chaque année plusieurs milliers de mineurs et d'ouvriers du bâtiment. Pour conserver leur habitat exempt de poussières, les astronautes devraient se nettoyer soigneusement avant d'y entrer. Cela ne serait pas facile : aimantées et chargées électriquement, les poussières collent partout. Les astronautes pourraient porter des combinaisons constituées de deux couches, dont la couche externe serait laissée dans un sas spécial, hors de la cabine principale.

Enfin la production d'électricité pâtirait également de ces poussières.

Sur *Mars Pathfinder*, la production de courant des panneaux solaires diminuait de un pour cent tous les trois jours, à mesure que de la poussière s'y accumulait. Une tempête de poussière réduirait de moitié la production de courant. C'est pourquoi une mission pourrait nécessiter un réacteur nucléaire de 100 kilowatts.

Les microbes qui accompagneraient inévitablement les astronautes sur Mars compliqueraient la recherche de vie martienne. Inversement, d'éventuels organismes martiens risqueraient d'arriver vers la Terre, au retour d'une mission. Ces organismes ne provoqueraient probablement pas de maladies chez l'homme ou chez d'autres espèces (la plupart des biologistes pensent qu'ils seraient trop différents des formes de vie terrestres), mais le risque d'une catastrophe globale n'est pas nul. La NASA étudie un système de bio-isolement pour les échantillons rapportés, mais la décontamination des astronautes est impossible. Durant le programme *Apollo*, les quarantaines étaient contraignantes, controversées et pas infaillibles. En 1992, les experts ont recommandé que l'on établisse l'existence de vie active ou dormante sur Mars avant d'y envoyer des astronautes ; ainsi les astronautes sauraient quelles régions de la planète peuvent être explorées en toute sécurité et quelles précautions ils devront prendre ailleurs pour éviter un contact direct avec une éventuelle forme de vie martienne.

George MUSSEY et Mark ALPERT sont journalistes à la revue *Scientific American*.

Un direct pour Mars

ROBERT ZUBRIN

Comment réduire les coûts de l'envoi d'astronautes sur la planète rouge.

« L'espace est là, et nous allons y monter. » Par ces mots prononcés en 1962, John Kennedy lançait le programme d'exploration de la Lune. Toutefois, pendant plus de 30 ans après l'alunissage d'*Apollo*, le programme spatial américain a manqué de vision cohérente sur ce que devrait être la prochaine étape. Je soutiens que l'exploration humaine de Mars et sa colonisation sont clairement les meilleurs objectifs.

Ce but n'est pas inaccessible. Toutes les techniques nécessaires pour envoyer des hommes sur Mars existent. Nous pouvons atteindre la planète rouge à l'aide d'un vaisseau de taille relativement réduite, lancé par des fusées analogues à celles qui emmenèrent les astronautes vers la Lune voilà plus d'un quart de siècle. La clef du succès est la stratégie qui fut celle de nombreux explorateurs du Globe : voyager léger et utiliser les ressources du pays. La première mission habitée vers Mars pourrait atteindre la planète dans moins d'une décennie. Voici comment se déroulerait cette mission, que j'ai nommée *Mars Direct*.

Projetons-nous dans quelques années, en 2005 par exemple. Un lanceur lourd, d'une puissance équivalente à celle des fusées *Saturne 5* de l'époque *Apollo*, décolle de cap Canaveral, en Floride. Lorsque le vaisseau est suffisamment haut, l'étage supérieur se détache du propulseur usagé, allume son moteur et expédie une charge utile inhabitée de 45 tonnes en direction de Mars.

Cette charge utile est le véhicule de retour qui ramènera les astronautes sur Terre. Ce véhicule transporte six tonnes d'hydrogène liquide, des compresseurs, une unité de traitement chimique automatique, quelques robots automobiles scientifiques de taille modeste, et un petit réacteur nucléaire de 100 kilowatts monté à l'arrière d'un robot automobile plus grand, alimenté par un mélange de méthane et d'oxygène. Le véhicule

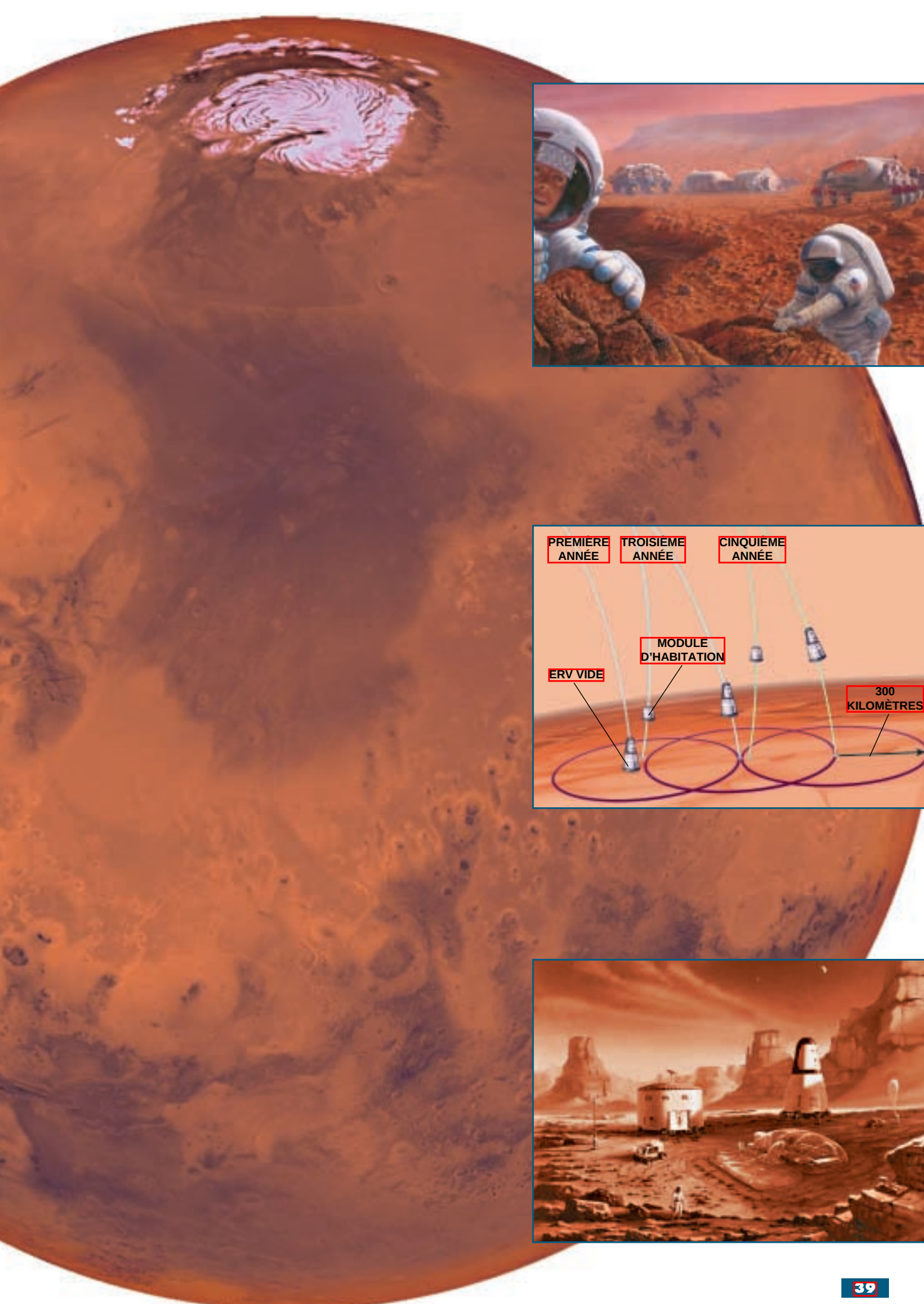
a des réservoirs de méthane et d'oxygène pour le retour, mais ils sont alors vides.

Huit mois après le décollage, le véhicule de retour arrive près de Mars, ralentit par «aérofreinage», une technique qui utilise le frottement de son bouclier thermique contre l'atmosphère de la planète. Le vaisseau se place en orbite autour de Mars, puis se pose sur la surface en utilisant un parachute et des rétrofusées. Dès que le vaisseau touche le sol, les ingénieurs du centre de commande sur la Terre pilotent le grand robot automobile et l'éloignent de quelques centaines de mètres. Les contrôleurs de mission activent alors le réacteur nucléaire, qui fournira l'énergie aux compresseurs et à l'unité de traitement chimique.

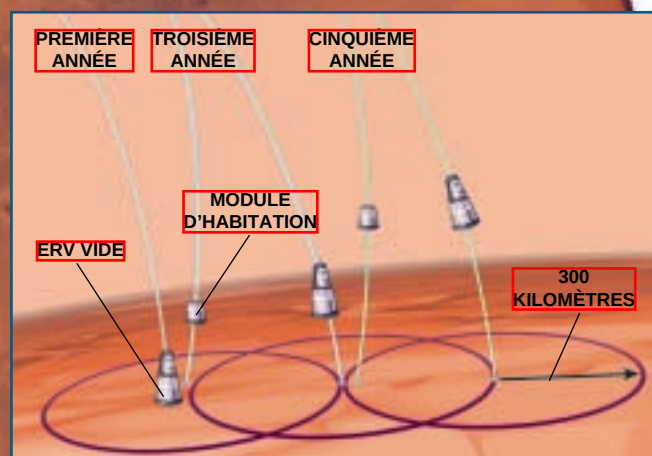
Dans cette unité, de l'hydrogène apporté de la Terre réagit avec l'atmosphère martienne, composée à 95 pour cent de dioxyde de carbone (CO_2) : on obtient de l'eau (H_2O) et du méthane (CH_4). Grâce à cette méthanation locale, inutile d'emporter et d'entreposer de l'hydrogène liquide pour le voyage de retour. Le méthane est liquéfié et entreposé, et les molécules d'eau sont électrolysées, c'est-à-dire dissociées en hydrogène et en oxygène. L'oxygène est conservé pour un usage ultérieur, tandis que l'hydrogène est recyclé par l'unité de traitement chimique, où il crée à nouveau de l'eau et du méthane.

Au total, ces deux réactions de méthanation et d'électrolyse fournissent 48 tonnes d'oxygène et 24 tonnes de méthane, qui seront les carburants du véhicule de retour. Pour assurer une combustion efficace du mélange méthane-oxygène, 36 tonnes supplémentaires d'oxygène doivent être produites, par dissociation du dioxyde de carbone de l'atmosphère martienne.

1. L'ENVOI D'ASTRONAUTES SUR MARS permettrait la recherche de signes de vie sur la planète rouge (cartouche supérieure). Dans le projet *Mars Direct*, un véhicule de retour sur Terre se posera d'abord sur la planète, afin de préparer l'arrivée des astronautes, deux ans plus tard (cartouche du milieu). De nouvelles missions auront lieu tous les deux ans, établissant une série de camps de base comme ceux qui sont représentés ici (cartouche inférieure).



SALU 121 121 121



EN 1212121



1212121 1212121 1212121

Après dix mois de telles réactions, 108 tonnes de méthane et d'oxygène auront été produites, soit 18 fois plus que de matière première apportée pour les produire.

Le voyage de retour consommera 96 tonnes de carburant, laissant 12 tonnes pour le fonctionnement des robots automobiles. Des réserves complémentaires d'oxygène seront aussi fabriquées, pour la respiration et la production d'eau.

Cette première base martienne fonctionnant avec succès, deux autres fusées quittent le cap Canaveral pour Mars en 2007. L'une d'elles emporte un véhicule de retour inhabité, identique à celui qui a été lancé en 2005. L'autre emporte un équipage de quatre hommes et femmes, et des provisions pour trois ans. Il transporte également un véhicule automobile pressurisé, fonction-

nant au mélange méthane-oxygène, qui permettra aux astronautes d'explorer la surface martienne en bras de chemise.

L'arrivée

Durant le voyage, une gravité artificielle égale à celle de Mars (4/10 de la gravité terrestre) règne dans le module d'habitation, grâce à sa mise en rotation autour d'un propulseur usagé maintenu par un câble. Ainsi, les effets d'une gravité nulle sur la condition physique des astronautes ne sont plus à craindre. Le rayonnement des éruptions solaires, composé de protons d'une énergie d'environ un million d'électronvolts, est arrêté par une dizaine de centimètres d'eau ou de provisions. La dose résiduelle de rayons cosmiques pour les deux ans et demi de mission fait courir un risque statistique de cancer d'en-

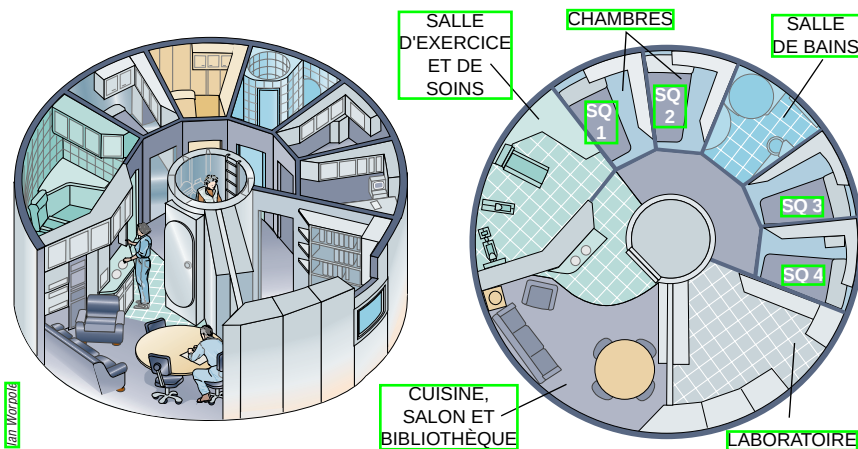
viron un pour cent, égal au risque de cancer qu'aurait un fumeur qui ne changerait pas sa façon de vivre pendant une période équivalente à la mission.

En abordant Mars, le module habité abandonne le câble et le propulseur usagé, «aérofreine» et se pose sur la base ouverte en 2005. Des balises déposées sur le site permettent au vaisseau de se poser au bon endroit, mais, même si l'atterrissage se fait à des dizaines, voire à des centaines de kilomètres de là, les astronautes peuvent revenir à la base avec leur véhicule automobile. Dans le cas improbable où ils atterri- raient à des milliers de kilomètres, le second véhicule de retour, lancé en même temps que le module habité, peut servir de système de secours. Et, au pire, les rations supplémentaires du module habité assureraient la survie de l'équi- page jusqu'à ce qu'un troisième véhi- cule de retour soit lancé, en 2009.

Toutefois, avec les techniques actuelles, le risque d'un atterrissage au mauvais endroit est faible. En suppo- sant que les astronautes atteignent le site 2005 comme prévu, le second véhi- cule de retour se pose à quelques cen- taines de kilomètres de là. Comme le premier, il commence à synthétiser des carburants, afin de préparer la mission de 2009 qui, à son tour, partira avec un autre véhicule de retour pour ouvrir une troisième base sur Mars.

Ainsi, les nations qui participeraient au projet *Mars Direct* lanceraient deux fusées lourdes tous les deux ans : une pour envoyer une équipe de quatre personnes habiter sur Mars, et l'autre pour préparer une nouvelle base pour la mission suivante. Le rythme moyen de un lancement par an ne représente qu'environ 15 pour cent de la cadence de lancement des navettes spatiales américaines. Grâce à la stratégie d'utili- sation des ressources martiennes pro- posées par *Mars Direct*, la perspective du voyage habité vers Mars quitte le domaine des projets grandioses, dignes de la science-fiction, et accède à un niveau de difficulté comparable à celui des missions *Apollo* vers la Lune.

Les astronautes envoyés sur Mars séjournent sur place pendant un an et demi, et explorent la surface à l'aide des véhicules automobiles. Grâce à une réserve de carburant de 12 tonnes pour ces engins, les astronautes peuvent par- courir plus de 24 000 kilomètres pen- dant leur séjour, une mobilité suffisante pour une recherche sérieuse d'une vie présente ou éteinte.



2. UNE HABITATION dans l'espace interplanétaire et sur Mars. La partie supérieure, représentée ici, comporte les quartiers de repos pour quatre personnes, ainsi qu'un laboratoire, une bibliothèque, une cuisine et un gymnase. Un abri anti-éruptions solaires occupe le centre. Le pont inférieur (non représenté) sert de garage, d'atelier et d'entrepôt. Pendant le voyage vers Mars, un système de rotation communique une gravité artificielle.

BESOINS CONSOMMABLES POUR UNE MISSION MARS DIRECT AVEC UN ÉQUIPAGE DE QUATRE PERSONNES				
	Besoins quotidiens par personne (en kilogrammes)	Pourcentage recyclé	Masse totale pour un vol aller de 200 jours (en kilogrammes)	Total pour un séjour de 600 jours en surface (en kilogrammes)
Oxygène	1,0	80	160	0
Nourriture lyophilisée	0,5	0	400	1 200
Nourriture complète	1,0	0	800	2 400
Eau potable	4,0	80	0	0
Eau à usage domestique	26,0	90	2 080	0
Total	32,5	87	3 440	3 600

Répartition des masses pour une mission Mars Direct

Elément ERV	Masse en tonnes	Module d'habitation	Masse en tonnes
• Structure de la cabine	3,0	• Structure de l'habitat	5,0
• Systèmes de survie	1,0	• Systèmes de survie	3,0
• Consommables	3,4	• Consommables	7,0
• Panneaux solaires (5 kilowatts d'électricité)	1,0	• Panneaux solaires (5 kilowatts d'électricité)	1,0
• Systèmes de contrôle d'attitude	0,5	• Systèmes de contrôle d'attitude	0,5
• Communications	0,1	• Communications	0,2
et gestion de l'information		et gestion de l'information	
• Mobiliers et aménagement	0,5	• Mobiliers et aménagement	1,0
• Combinaisons spatiales (4)	0,4	• Combinaisons spatiales (4)	0,4
• Équipements de rechange et marge (16 pour cent)	1,6	• Équipements de rechange et marge (16 pour cent)	3,5
• Bouclier d'aérofreinage	1,8	• Véhicule automobile pressurisé	1,4
• Véhicule automobile	0,5	• Véhicules automobiles ouverts (2)	0,8
• Réserve d'hydrogène	6,3	• Équipement de laboratoire	0,5
• Étages de propulsion	4,5	• Équipement scientifique de terrain	0,5
• Unité de production de propergol	0,5	• Équipage	0,4
• Réacteur nucléaire (100 kilowatts d'électricité)	3,5		
• Masse totale de l'ERV	28,6	• Masse totale de l'ERV	25,2



Don Direct

3. LE VEHICULE DE RETOUR SUR TERRE (ERV) décolle de la surface de Mars avec un équipage de quatre personnes. Les charges utiles de ce véhicule et du module habité sont détaillées dans le tableau.

Avec ce projet, personne ne reste en orbite, de sorte que tous les astronautes bénéficient de la gravité martienne et de la protection contre le rayonnement assurée par l'atmosphère. En conséquence, le retour sur Terre n'est pas urgent, contrairement aux projets qui comprennent un vaisseau-mère orbital et de petites expéditions sur la surface. À la fin de leur séjour, les astronautes reviennent par vol direct à bord du véhicule de retour. La série de missions constituera une chaîne de petites bases sur la planète, ouvrant de larges zones de Mars à une exploration humaine continue et, finalement, à une colonisation.

Planète Mars

En 1990, lorsque nous avons soumis le projet *Mars Direct* pour la première fois, la NASA le jugea excessivement novateur. Depuis, le groupe chargé de la conception des missions habitées vers Mars a décidé de le réexaminer.

En 1994, des chercheurs de ce groupe ont évalué les coûts d'un programme analogue à *Mars Direct*, mais deux fois plus ambitieux : le budget serait de 250 milliards de francs. En

1989, ce même groupe avait estimé le coût d'une approche classique fondée sur l'assemblage orbital d'un vaisseau unique à 3 000 milliards de francs. Avec une conception de la mission plus rigoureuse, je pense que notre projet coûterait 120 à 180 milliards de francs. Réparti sur dix ans, ce montant constituerait une dépense annuelle d'environ 20 pour cent du budget de la NASA, ou de un pour cent du budget militaire américain.

Afin de mobiliser le public pour l'exploration de Mars – par des systèmes automatiques et par des astronautes – et afin de chercher des crédits privés pour organiser les missions, nous avons créé l'Association Planète Mars (*Mars Society*) en 1998. Le premier projet de l'association est la construction d'une base de simulation martienne, dans le cratère d'impact météoritique Haughton, sur l'île Devon, dans l'Arctique canadien. La base MARS (*Mars Arctic Research Station*, soit «station de recherche arctique pour Mars»), située dans une région au climat et à la géologie similaires à ceux de Mars, servira aux tests des tactiques d'exploration humaine et des équipements, dont les modules d'habitation, les engins mobiles de surface,

les systèmes photovoltaïques et des dispositifs de forage spécialisés. La base MARS sera opérationnelle à l'été 2000.

Grâce à ce projet, nous augmenterons la confiance des investisseurs dans nos programmes, afin de contribuer au financement des missions automatiques vers Mars et à celui des expéditions humaines. Notre premier objectif est de montrer aux gouvernements pourquoi l'exploration de Mars est intéressante.

Je crois qu'un jour des millions de gens vivront sur Mars. Quelle langue parleront-ils? Quelles valeurs et quelles traditions emporteront-ils quand, de Mars, ils iront ailleurs dans le Système solaire et au-delà? Quand ils penseront à notre époque, quelle autre entreprise du passé leur semblera aussi importante que celle de l'Association Planète Mars? Nous avons aujourd'hui l'opportunité d'être les fondateurs d'une nouvelle branche de la famille humaine et d'imprimer notre marque au futur. C'est un privilège inestimable.

Robert ZUBRIN est président de la *Mars Society* et fondateur de la *Société Pioneer Astronautics*.

Mars via ses lunes

FRED SINGER

Phobos et Deimos, satellites de Mars, pourraient être des bases intermédiaires, à partir desquelles on explorerait la planète rouge.

Depuis 30 ans, le débat qui oppose les partisans des vols habités à ceux des missions automatiques n'a guère changé. Toutefois, au fil des ans, certains de ceux qui étudient les satellites robotisés ont adopté une attitude plus modérée : dans certaines circonstances, l'envoi d'êtres humains dans l'espace est plus rentable que le lancement de robots. L'exploration de Mars serait plus facile et plus fructueuse avec des vols habités.

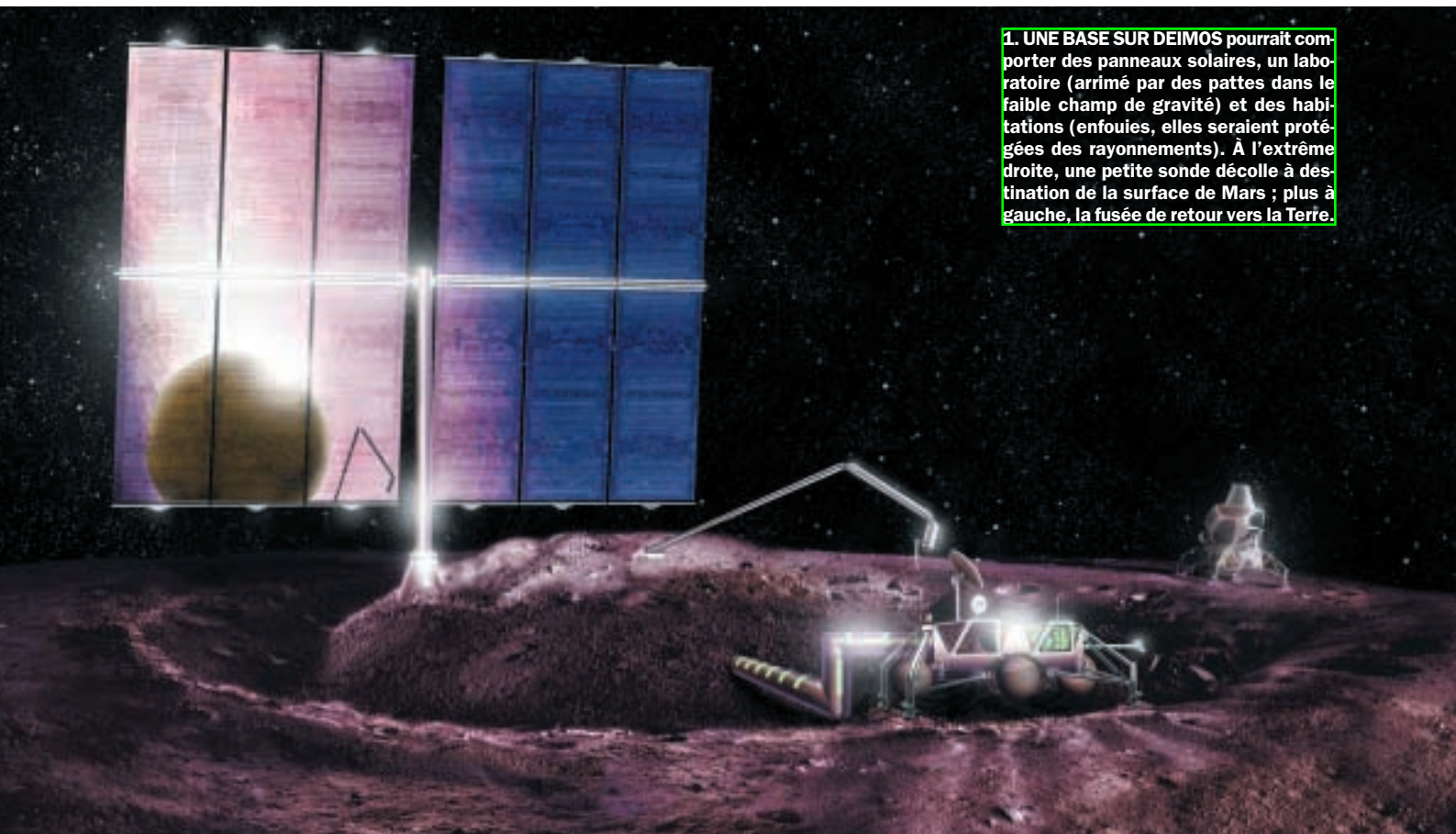
En effet, les astronautes ont l'avantage de pouvoir explorer Mars en temps réel, sans délais de communication, et concevoir de nouvelles expériences dans le prolongement de résultats antérieurs. Les robots, même après plusieurs décen-

nies de recherches, ne se débrouillent pas sans intervention humaine. Doit-on toutefois envoyer des astronautes jusqu'à la surface de Mars ? Cette solution évidente n'est pas nécessairement la meilleure. Lors de la première conférence « Plaidoyer pour Mars », en 1981, l'une des conclusions les plus hardies fut que les lunes martiennes, Phobos et Deimos, pourraient servir de têtes de pont relativement peu coûteuses.

La plupart des projets prévoient l'utilisation de deux engins spatiaux. Le premier déposerait sur Mars, ou dans son voisinage, du carburant et d'autres équipements lourds, tels des modules de rechange et des véhicules de retour. La durée du trajet n'étant

pas cruciale, ce vaisseau naviguerait par propulsion électrique et assistance gravitationnelle. Au contraire, l'engin qui conduirait les astronautes devrait être le plus rapide possible, afin que ses occupants ne s'attardent pas près des ceintures de radiations qui entourent la Terre et qu'ils ne manquent pas de vivres et d'oxygène. Les fusées qui emporteraient les astronautes doivent avoir un moteur chimique.

Après le rendez-vous de l'engin habité et du vaisseau cargo près de la planète rouge, le déroulement des opérations diffère selon les programmes. Dans l'ordre de difficulté et de coût croissants, les six solutions sont : un survol de Mars analogue aux premières mis-



1. UNE BASE SUR DEIMOS pourrait comporter des panneaux solaires, un laboratoire (arrimé par des pattes dans le faible champ de gravité) et des habitations (enfouies, elles seraient protégées des rayonnements). À l'extrême droite, une petite sonde décolle à destination de la surface de Mars ; plus à gauche, la fusée de retour vers la Terre.

sions *Apollo*, suivi d'un retour immédiat vers la Terre ; un orbiteur martien autorisant un séjour prolongé près de la planète ; une mission Phobos-Deimos (Ph-D), qui comprend un transfert sur une orbite circulaire équatoriale, avec un alunissage et la constitution d'une base sur l'une des lunes de Mars, de préférence Deimos ; une mission hybride (Ph-D+) qui comporte aussi un bref séjour sur la surface de Mars ; un atterrissage sur Mars, avec un séjour de plus longue durée et un programme complet de recherche ; enfin, un séjour prolongé sur Mars, pendant lequel les astronautes érigent des structures permanentes et entament un séjour continu sur la planète.

Je crois que la première mission habitée doit être ambitieuse – l'aventure fait partie de l'attrait –, mais pas trop, surtout financièrement. Les missions Ph-D et Ph-D+ équilibrent remarquablement les coûts et les bénéfices.

Deimos conviendrait très bien à l'établissement d'une base pour l'étude de Mars : de là, les astronautes pourraient envoyer des sondes atmosphériques, des engins foreurs et des robots automobiles, qu'ils dirigeraient ensuite sur toute la surface de Mars. L'orbite quasi synchrone de cette lune permet



de conserver le contact avec un véhicule pendant près de 40 heures d'affilée. Phobos, plus proche de la planète, tourne plus vite et ne possède pas cet avantage. Cependant, quelle que soit la lune retenue, les astronautes pourraient analyser les échantillons récoltés sans craindre de contaminer la Terre par des formes de vie martiennes.

L'absence d'atmosphère sur ces satellites est un autre avantage : on manipulerait plus facilement des instruments de laboratoire qui ne fonctionnent que sous vide, comme des spectromètres de masse ou des microscopes électroniques. En se déplaçant sur le satellite – ce qui est aisé en raison de la gravité minime –, les astronautes se protégeraient des éruptions solaires et des chutes de météorites. En outre, les satellites martiens sont des corps fascinants par eux-mêmes. Des échantillons prélevés directement sur ces corps permettraient d'étudier leur origine.

Une base habitée à la surface de Mars serait bien plus difficile à gérer. Les véhicules déployés ailleurs sur la planète devraient toujours être télécommandés, ce qui nécessiterait un relais de commande par des satellites. La récolte d'échantillons loin de la base serait plus difficile. Des batteries d'appoint lourdes ou des générateurs nucléaires seraient indispensables pour alimenter la base pendant la nuit ou pendant les tempêtes de poussière.

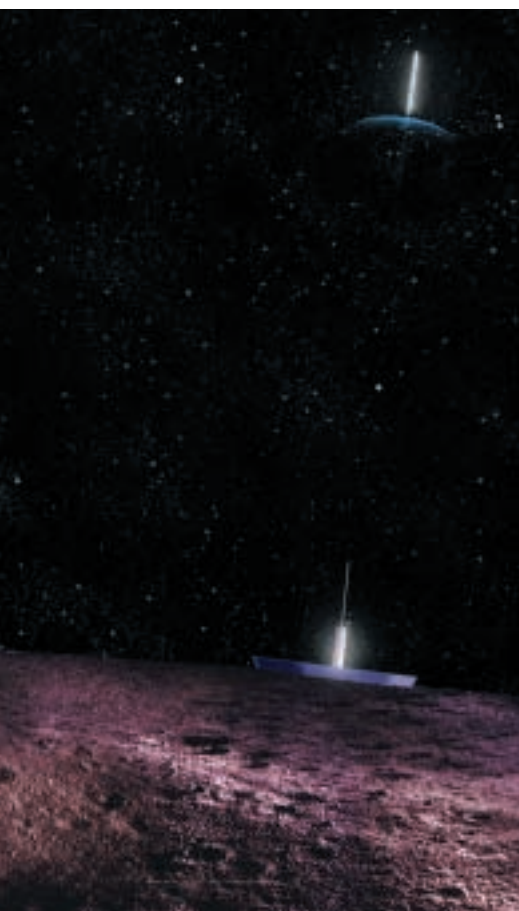
La plupart des avantages d'un vol habité vers Mars, tant sur le plan de

la science que sur celui de l'aventure, seraient obtenus par des vols habités vers les satellites martiens. Une petite navette suffirait, au lieu d'un module d'atterrissage élaboré, ce qui réduirait les coûts de la mission. Venant d'une base établie en orbite, les astronautes seraient en mesure de sélectionner le site d'arrivée sur Mars avec plus de flexibilité, alors que l'équipage d'un gros module d'atterrissage martien devrait jouer la sécurité, choisissant un site propice au lancement du voyage de retour vers la Terre.

Dans un avenir plus lointain, les satellites pourraient servir de haltes pour descendre sur Mars ou en remonter à l'aide de câbles. Les climatologues installés sur Deimos pourraient mener sans danger des expériences climatologiques, comme l'altération du climat ou la fusion des calottes polaires afin de tester les techniques de «terraformation» de Mars ou d'atténuation des changements de climat sur la Terre.

Les coûts et les bénéfices des divers scénarios restent difficiles à estimer, mais une enquête m'a montré que le projet Ph-D+ a la faveur des experts en missions martiennes. Toute la science, plus vite et moins cher ! Cette mission serait une bonne première étape pour établir une base et une colonie sur Mars.

Fred SINGER est professeur de planétologie à l'Université George Mason.



Un autobus entre les planètes

JAMES OBERG • BUZZ ALDRIN

Grâce aux techniques d'assistance gravitationnelle, les coûts des trajets entre la Terre et Mars seraient considérablement réduits.

Grâce aux fusées à propulsion chimique, l'humanité a fait ses premiers pas dans l'espace. L'un de nous (B. Aldrin), porté jusqu'à la Lune par l'une d'entre elles, connaît leurs mérites, mais il sait aussi qu'elles n'emporteront pas les astronautes très au-delà du satellite naturel de la Terre.

Pour emmener un équipage sur Mars à l'aide de moteurs chimiques et en revenir, il faudrait tant de carburant que la plupart des projets envisagent sa production à la surface de Mars. Cette opération complique les missions projetées. Les fusées à propulsion plasmique, bien plus puissantes, n'équiperont sans doute pas de vaisseau habité avant une décennie.

Pourquoi, alors, ne pas accroître l'autonomie des fusées à propulsion chimique en profitant des forces gravitationnelles des corps célestes ? Si l'on faisait passer les engins spatiaux tout près des planètes, le champ gravitationnel de celles-ci modifierait la vitesse de l'engin. On a souvent utilisé cette méthode pour accélérer une sonde lancée vers les planètes du Système solaire qui, autrement, auraient été inaccessibles.

Les contrôleurs de mission commencèrent à employer l'assistance gravitationnelle dans les années 1970. Lors de la mission *Mariner 10*, lancée vers Mercure, on utilisa le champ gravitationnel de Vénus ; *Pioneer 11*, vers Saturne, profita de Jupiter ; et *Voyager 1*, catapulté par le champ gravitationnel prodigieux de Jupiter, erre aujourd'hui dans l'espace interstellaire à la vitesse de 62 000 kilomètres par heure. Même si, entre la Terre et Mars, il n'existe pas d'objets de taille adéquate, la trajectoire entre les deux planètes peut être calculée de manière à bénéficier de leur gravité.

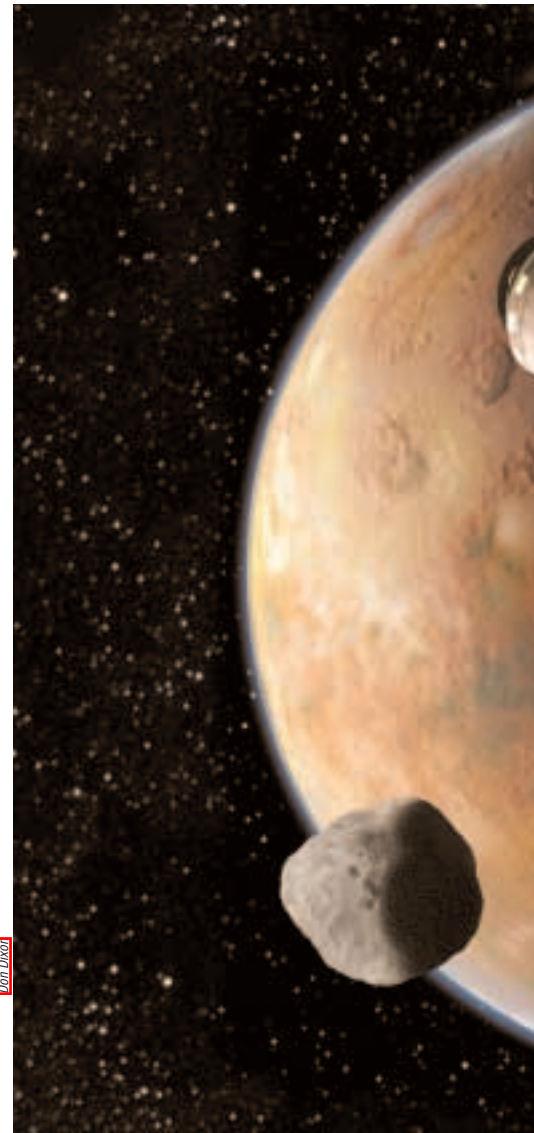
Rebond sur un mur gravitationnel

Une manœuvre d'assistance gravitationnelle s'apparente au rebond d'une balle sur un mur : l'engin spatial est comme la balle, et la planète comme le mur. Dans le cas de la balle, sa vitesse après le rebond augmente ou diminue selon que le mur s'approche ou s'éloigne de la balle au moment du choc. La relation entre les vitesses résulte de la conservation de la quantité de mouvement. La variation de la quantité de mouvement du ballon est égale à la variation inverse de la quantité de mouvement du mur. Si le mur avance vers la balle, la balle prend de la vitesse au mur, qui ralentit un tout petit peu (car il est bien plus massif que la balle).

Ainsi, lors d'une manœuvre d'assistance gravitationnelle, le vaisseau spatial entre en « collision » élastique avec le champ gravitationnel de la planète. Si la planète se meut dans la même direction que l'engin lorsque celui-ci s'approche de la planète, la vitesse du véhicule après « rebond » sera supérieure à sa vitesse d'approche. Comme dans le cas de la balle qui rebondit contre un mur, la quantité de mouvement est conservée : la quantité de mouvement de la planète change autant que celle du vaisseau. Cependant, en raison de l'immense différence de masse, la vitesse de la planète ne varie pas de manière appréciable.

Plus la planète est massive, plus la trajectoire de la sonde peut être modifiée. Jupiter, qui est la planète la plus massive du Système solaire, peut modifier la trajectoire d'une sonde de 160 degrés. Par cette méthode, non seule-

ment les contrôleurs de vol peuvent modifier la vitesse et la direction d'une sonde dans le plan orbital, mais ils peuvent aussi catapulter l'engin dans un plan orbital différent de celui de l'orbite de la planète autour du Soleil (grâce à l'assistance gravitationnelle de Jupiter, la sonde *Ulysse* a quitté le plan orbital des planètes en 1992).



Comment l'assistance gravitationnelle contribuerait-elle à conduire des êtres humains vers Mars? Elle pourrait mettre en mouvement un vaisseau spatial qui fera la navette entre la Terre et Mars. Cet «astrobus», qui ne ralentira pas pour se mettre en orbite autour de Mars, n'aura pas besoin de s'arracher à la planète pour revenir sur Terre : il sera sur une trajectoire cyclique autour des deux planètes. Ce concept est attrayant, car il minimise le recours à des manœuvres propulsives, ce qui diminue les quantités de carburant à emporter.

Des châteaux parmi les étoiles

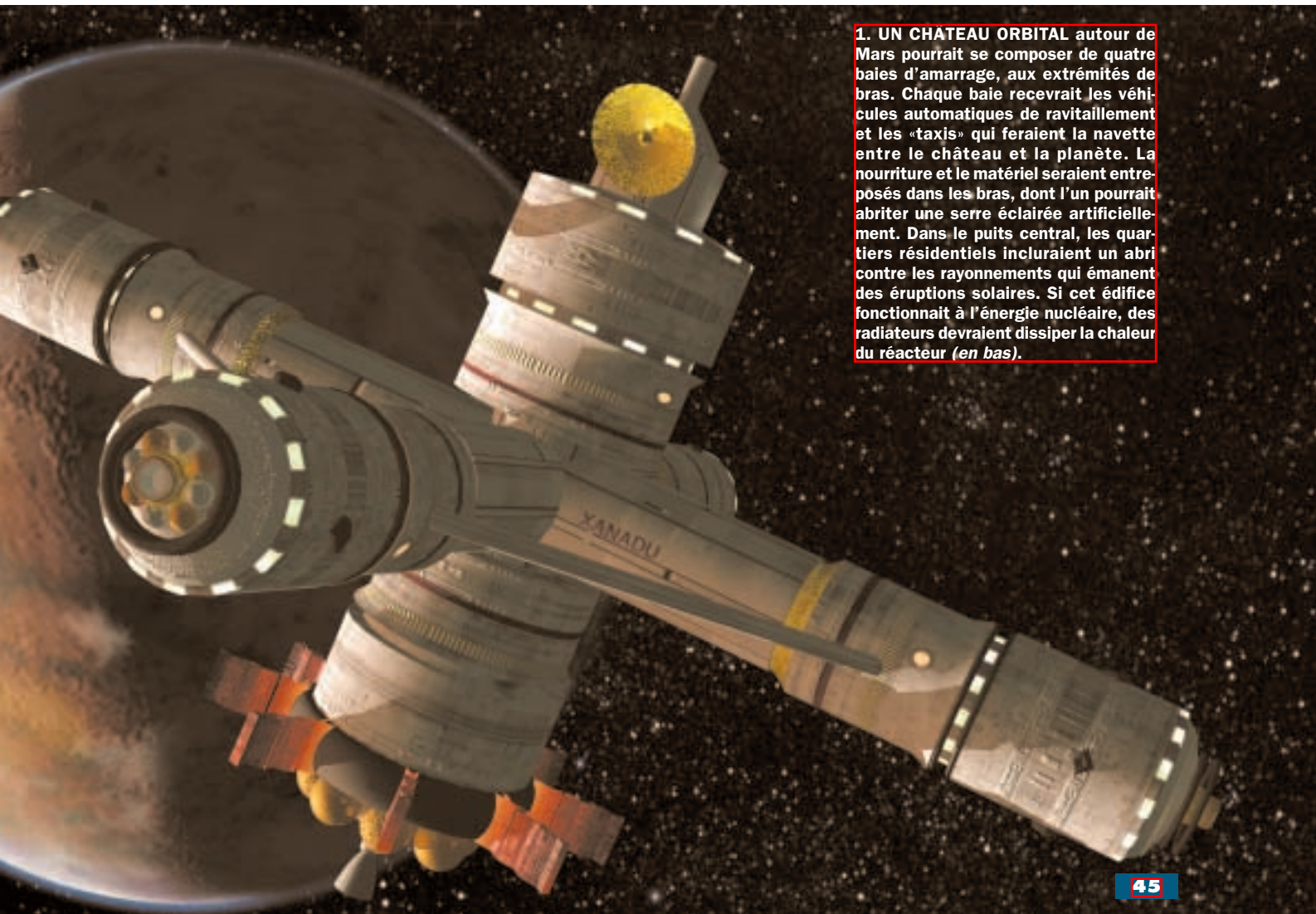
Le concept de l'astrobus date du début des années 1980. Alan Friedlander et John Niehoff, de la Société *Science Applications International*, ont décrit un système où plusieurs stations spatiales (qu'ils nommaient châteaux) occuperaient des orbites héliocentriques qui se rapprocheraient périodiquement de la Terre et de Mars. Les astronautes habiteraient ces châteaux pendant la

croisière interplanétaire, qui durerait au moins deux ans. Lors des rencontres avec Mars ou avec la Terre, les voyageurs utiliseraient des véhicules plus légers – des «taxis» –, pour se déplacer entre un château et la planète. Les châteaux seraient réapprovisionnés à l'aide de fusées propulsées par des moteurs efficaces, tels les moteurs ioniques, mais trop lents pour des passagers humains. Le voyage à bord du taxi entre un château et la planète prendrait moins d'une semaine.

Initialement, J. Niehoff et A. Friedlander avaient prévu que les châteaux tourneraient autour du Soleil, de manière à croiser la Terre environ tous les cinq ans et Mars tous les 3,75 ans. Puis on a trouvé un moyen pour que les astrobus rencontrent la Terre tous les trois ans et Mars tous les 7,5 ans. Aucune de ces orbites ne serait modifiée lors des rencontres planétaires. Une fois placés sur la trajectoire adéquate, ces châteaux suivent leur orbite de manière balistique, sans propulsion ou assistance gravitationnelle. En 1985, B. Aldrin a proposé une

orbite pour l'astrobus qui utiliserait l'assistance gravitationnelle à chaque survol de la Terre. De la même façon que précédemment, ces châteaux tourneraient autour du Soleil. Avec ces orbites, chaque planète est approchée tous les 2,7 ans, et le temps de transit entre planètes ne dépasse pas six mois. Pour maintenir l'astrobus sur cette orbite avantageuse, des phases de propulsion sont nécessaires. Toutefois, comme ces manœuvres n'ont pas besoin d'être particulièrement rapides, elles peuvent être effectuées par des systèmes de propulsion de haut rendement et de faible poussée.

En outre, l'une des manœuvres les plus délicates est obtenue par assistance gravitationnelle. L'intervalle de temps séparant les rencontres entre l'astrobus et Mars n'est pas un multiple exact de l'année martienne. Ainsi, la planète occupe, par rapport au Système solaire, une position différente chaque fois que l'astrobus s'apprête à faire son approche. Pour cette raison, il faut continuellement ajuster l'orbite de l'astrobus pour qu'il croise la planète. En termes techniques,



1. UN CHATEAU ORBITAL autour de Mars pourrait se composer de quatre baies d'amarrage, aux extrémités de bras. Chaque baie recevrait les véhicules automatiques de ravitaillement et les «taxis» qui feraient la navette entre le château et la planète. La nourriture et le matériel seraient entreposés dans les bras, dont l'un pourrait abriter une serre éclairée artificiellement. Dans le puits central, les quartiers résidentiels incluraient un abri contre les rayonnements qui émanent des éruptions solaires. Si cet édifice fonctionnait à l'énergie nucléaire, des radiateurs devraient dissiper la chaleur du réacteur (en bas).

les contrôleurs de mission doivent tourner suffisamment la ligne des apsides (la ligne joignant le point de l'orbite le plus éloigné du Soleil à celui le plus proche) de l'orbite de l'astrobus de sorte que la trajectoire coïncide avec la position de Mars lors de la rencontre suivante. Ce décalage peut s'obtenir presque uniquement par assistance gravitationnelle de la Terre.

En raison de son orbite allongée, l'astrobus croise la Terre et, surtout, Mars à vitesse relativement élevée. Ce serait gênant si l'on devait freiner l'astrobus massif en vue d'une rentrée atmosphérique. L'utilisation de taxis légers pour aller vers les planètes supprime ce problème.

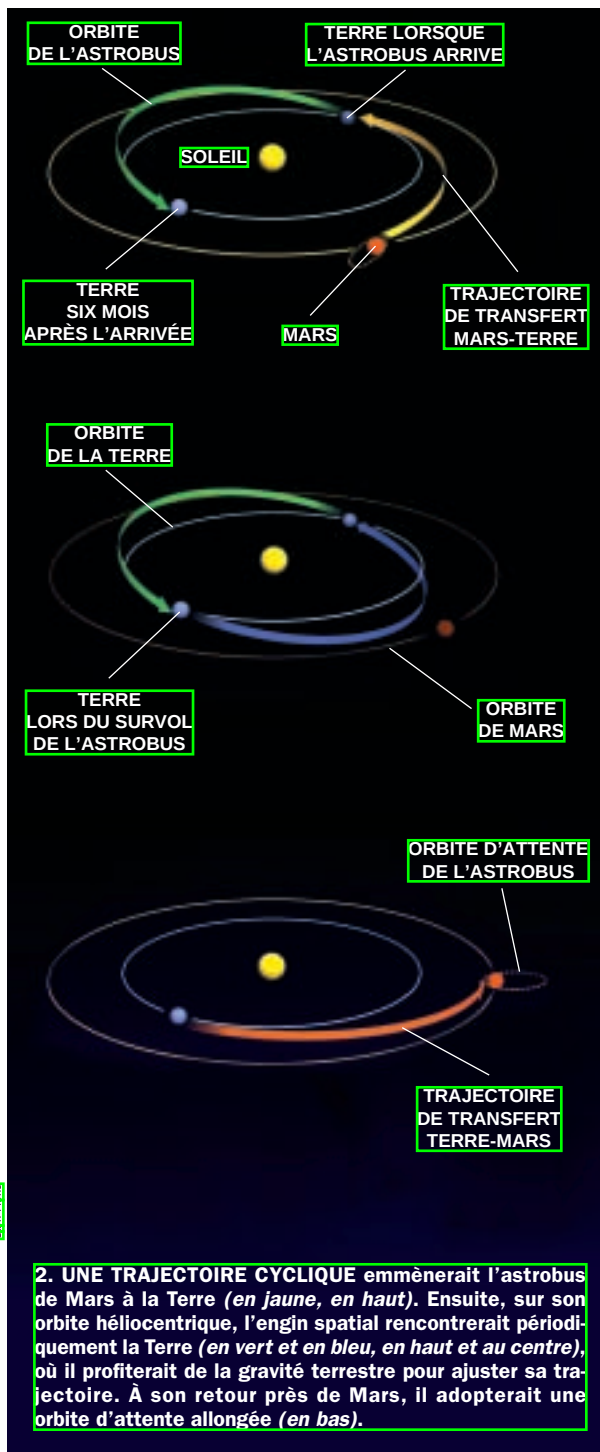
Quel serait le coût d'une mission fondée sur l'emploi d'astrobus? Les missions de ce genre nécessiteront de nombreuses infrastructures en orbite. Cependant, une fois en place, un astrobus pourra conduire des dizaines, voire des centaines d'astronautes vers Mars.

Des astrobus améliorés

B. Aldrin a affiné ses idées sur les astrobus et sur l'exploration de Mars. Dans son dernier projet, les astrobus suivent des trajectoires qui croisent les planètes à des vitesses inférieures, accordant plus de temps et de flexibilité aux voyages entre l'astrobus et les planètes. Au lieu d'une simple séquence de rencontres alternées Terre-Mars-Terre-Mars, il prévoit un «temps de repos» près de Mars et de la Terre.

Dans ce projet, le passage

unique près de la Terre devient une série de rencontres Mars-Terre-Terre-Terre-Terre-Mars (voir la figure 2). Durant la portion terrestre de la trajectoire, l'astrobus demeure sur une orbite héliocentrique, comme la Terre, mais, tous les six mois, il survole la Terre en utilisant le champ gravitationnel de la planète pour ajuster son orbite en vue de la rencontre suivante. Le survol de Mars comporte aussi une période durant laquelle l'astrobus attend que la Terre soit en bonne posi-



tion pour le retour. La trajectoire se répète tous les 52 mois, laps de temps pendant lequel la Terre et Mars sont deux fois en conjonction.

Pour accomplir les manœuvres de survol bisannuel de la Terre, les contrôleurs profiteraient de la gravité terrestre afin de décaler le plan orbital du vaisseau spatial autour du Soleil vers un autre plan incliné de plus de dix degrés par rapport à celui de la Terre, mais avec la même période orbitale que la Terre (un an). Cette stratégie utilise trois

manœuvres consécutives (ou une rencontre de six mois suivie ou précédée d'une autre rencontre de 12 mois), suivies d'une assistance gravitationnelle vers la partie martienne du trajet. La NASA prévoit d'utiliser la trajectoire de rencontre Terre-Terre de six mois pour la mission *Mars Sample Return* prévue pour 2005 et pour la mission scientifique *CONTOUR* du programme *Discovery*.

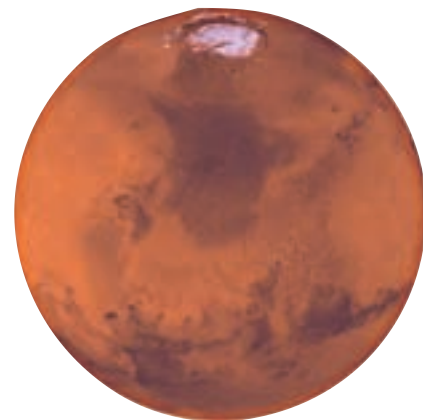
L'introduction d'un temps de repos près de Mars présente de nombreuses difficultés. Avec un astrobus de la masse envisagée et avec les vitesses d'approche prévues, Mars n'est pas suffisamment massive pour dévier la trajectoire de l'astrobus ne serait-ce que de dix degrés. Probablement les contrôleurs devront-ils utiliser l'assistance gravitationnelle de Mars, plus une petite phase propulsive, afin de tourner le vaisseau spatial vers le Système solaire interne. Le véhicule rencontrera alors Vénus et exploitera la gravité de cette planète, semblable à celle de la Terre, pour se rediriger en vue d'une nouvelle rencontre avec Mars.

Dennis Byrnes, du Laboratoire de propulsion spatiale de Pasadena, a récemment analysé des options de trajectoire similaires. Il a vérifié la faisabilité d'un système fondé sur trois astrobus qui suivent une trajectoire couvrant trois périodes synodiques (environ 78 mois) avec cinq survols de la Terre, espacés d'un an, entre rencontres martiennes. Un tel système permettrait de faire un voyage de la terre à Mars, ou vice versa, tous les 26 mois.

Les études de l'opportunité de l'astrobus par les spécialistes des missions spatiales ne font que commencer. Grâce à leurs idées, constamment améliorées, il devient probable qu'un jour l'humanité utilisera ce concept remarquablement flexible et robuste pour atteindre la planète rouge, non pas pour un voyage, mais pour une multitude de voyages.

James OBERG et Buzz ALDRIN ont travaillé à la NASA.

Un moral jusqu'au ciel



SARAH SIMPSON

Suffit-il d'avoir l'«étoffe des héros» pour garder le moral durant les longs voyages interplanétaires ?

Quand il arriva dans le sas d'entrée de la station *Mir*, l'astronaute australien Andy Thomas comprit que ce serait dur. Il avait l'impression d'entrer dans un puits de mine sombre. Le boyau s'ouvrit finalement sur un compartiment

exigu, dont le plafond et les murs étaient maculés de taches de café, là où ils n'étaient pas déjà couverts de boîtes métalliques, de livres et de tuyaux enchevêtrés. Avec deux autres astronautes, A. Thomas resterait confiné dans ce réduit cinq mois durant.

Ces cinq mois ne sont rien en comparaison d'une mission aller et retour sur Mars ; les astronautes seraient cloîtrés dans une capsule jusqu'à huit mois d'affilée et isolés du reste du monde pendant deux ans et demi. Voir les mêmes visages jour après jour,



DES ASTRONAUTES CLOÎTRÉS, comme cette équipe à bord de la navette spatiale *Atlantis* en janvier 1997, risquent de ne pas être aussi joyeux durant un voyage de six mois vers Mars.

subir les malaises et la désorientation de l'impesanteur, ne jamais avoir un moment seul... Nombre de familles se défont pour moins que cela. Le voyage vers Mars, qui devrait être une immense aventure humaine, se transformerait en échec cuisant si les concepteurs de missions ne trouvaient pas des moyens d'empêcher les explorateurs de l'espace de s'entre-déchirer.

Selon A. Thomas, la volonté suffit à conserver une ambiance supportable lors d'une mission de dix jours, mais des missions plus longues deviendront insupportables sans précautions particulières. Tout comme les ingénieurs veillent à ne pas en demander trop au matériel (en intégrant des marges de sécurité et de nombreux systèmes de secours), il ne faut pas en demander trop aux hommes. Il ne suffit pas de dire : les astronautes qui iront sur Mars ont reçu l'entraînement adéquat, donc ils peuvent tout supporter. Le risque est trop grand. Les individus que l'on enverra sur Mars seront certes spéciaux, mais ce ne seront pas des dieux.

Une analyse des missions passées révèle les difficultés possibles. Le surmenage a conduit l'équipage de la station spatiale *Skylab* à la révolte lors de la troisième et dernière rotation de l'équipage, qui a commencé en novembre 1973 : les trois hommes avaient pris du retard sur le programme et ils se sont accordé une journée de repos, désobéissant ainsi aux instructions des contrôleurs au sol. La station spatiale *Mir* fut également le théâtre de tensions, selon des rapports d'astronautes et de cosmonautes qui y séjournèrent. Les différences linguistiques et culturelles amplifient le stress : les Américains se plaignaient du comportement autoritaire des Russes, les Russes se plaignaient de l'ego exacerbé de certains de leurs visiteurs.

Ces difficultés ne surprennent aucun de ceux qui ont connu un confinement similaire dans les sous-marins nucléaires, sur les plates-formes pétrolières off-shore et dans les stations de l'Antarctique. Le psychologue Jack Stuster, qui a fait des études de comportement pour la NASA, cite l'historique d'un mécanicien d'une petite base de la marine américaine, en Antarctique, qui déprima tant qu'il négligea le seul générateur de l'installation. Si le médecin ne l'avait pas

aidé, son état aurait pu condamner l'ensemble du personnel.

Les conflits interpersonnels sont les problèmes les plus fréquents. Le sentiment d'être exclu d'un groupe ou l'exaspération due à la répétition de la même blague conduisent à de graves conflits en cas de promiscuité. Ces problèmes ont rarement compromis des missions, mais, durant un voyage vers Mars, les dissensions dans un équipage seraient désastreuses.

Les psychologues cherchent des moyens objectifs de détecter le plus tôt possible les défaillances. Les auto-évaluations des astronautes sont peu efficaces : des professionnels entraînés peuvent affirmer qu'ils vont bien alors qu'ils sont incapables de travailler. Il est étonnant de voir à quel point les gens surestiment leur capacité à surmonter ces problèmes ou même oublient de s'y préparer. Parmi les six astronautes qui séjournèrent à bord de *Mir*, certains n'emportèrent pas suffisamment de bagages pour occuper leur temps libre, d'où un ennui qui engendra un traumatisme de réclusion et une irascibilité exacerbée. Pour ne pas être confronté à ces problèmes, A. Thomas emporta des crayons et du papier, de sorte qu'il put s'adonner au dessin. Lors du voyage vers Mars, la sous-occupation et l'ennui seront un problème. Les Russes ont mis au point une batterie de tests visant à surveiller une baisse de performance, signe de problèmes éventuels.

Le succès d'une mission résultera d'une sélection des membres d'équipage. La sélection psychologique n'est pas toujours prise en compte, mais pour des vols longs, elle sera indispensable. Dans un premier temps, l'entretien psychologique permet d'éliminer les problèmes pathologiques, mais rien ne remplace les simulations. Les Européens et les Russes ont déjà procédé à des simulations longues : 60 jours d'isolement pour quatre personnes et 135 jours par une simulation de séjour sur *Mir*. Actuellement, une simulation de séjour dans la Station spatiale internationale s'organise à Moscou. Avant les vols pour Mars, les hivernages en Antarctique seraient un bon test.

Sarah SIMPSON est journaliste à la revue *Scientific American*.

PLANETE MARS l'association



section française de la Mars Society

partez à la découverte
d'un nouveau monde

prenez part
à cette grande
aventure humaine

restez au contact
de l'événement

les missions

les découvertes

les projets...

bulletin

conférences

site et liens internet

forum de discussion

association "Planète Mars"

<http://www.planete-mars.com>

28, rue de la Gaîté 75014-Paris

La biologie des phobies

ARNE OHMAN

Les réactions de peur, telles l'accélération du rythme cardiaque, l'augmentation de la tension artérielle ou l'immobilisation, sont activées par divers stimulus, avant même que ceux-ci ne soient consciemment identifiés. Quand ces mécanismes inconscients sont trop intenses, la peur salvatrice devient panique paralysante.

Les yeux rivés sur le sol à la recherche de chanterelles, je me promène dans la forêt. Tout à coup, je m'immobilise à la vue d'une vipère enroulée sur elle-même, à quelques pas devant moi. Mon cœur bat la chamade, une vague d'angoisse m'envahit, je recule le plus doucement possible. Les événements se sont déroulés dans cet ordre : d'abord, j'ai été cloué sur place, puis j'ai identifié la forme comme étant bien celle d'un serpent. J'ai reconnu que c'était un serpent alors que mon organisme était déjà préparé à réagir et, alors seulement, j'ai volontairement reculé pour m'éloigner de l'animal. Les récentes recherches en psychologie et en neurosciences éclairent ces réactions « normales », mais aussi celles des personnes qui, par peur de rencontrer un serpent, refusent toute promenade en forêt. Si nous comprenons les mécanismes qui gouvernent les réactions de panique, peut-être saurons-nous effacer ou contrôler ces aversions instinctives et handicapantes, les phobies.

On a longtemps cru qu'il fallait avoir conscience du danger pour réagir : c'était une erreur. On a découvert que des réactions de peur peuvent être déclenchées avant même que l'on ait pris conscience des stimulus déclenchants, et que ces réactions sont commandées par un circuit neuronal sous-cortical qui opère indépendamment des circuits corticaux activés lors de la perception consciente des stimulus.

Nous avons étudié comment les stimulus effrayants captent l'attention. Pour ce faire, à l'Institut Karolinska, nous avons avec Anders Flukt, de l'Université de Genève, et Francisco Esteves, de l'Université de Lisbonne, suivi les réactions de volontaires lors d'une tâche visuelle. De telles expériences sont utilisées pour déterminer les facteurs qui

favorisent la détection d'un stimulus cible parmi un ensemble de stimulus perturbateurs. Par exemple, on peut assimiler ma recherche de chanterelles à une tâche visuelle où j'essayais de distinguer des chanterelles parmi d'autres champignons ou des objets « perturbateurs », telles des feuilles qui auraient eu les mêmes couleurs jaune-orangé que les chanterelles.

Détection rapide de la menace

Pour étudier comment un « stimulus serpent » ou un « stimulus araignée » attire l'attention, nous avons préparé des montages de neuf images (trois lignes sur trois colonnes), constitués soit d'images de la même catégorie (des champignons uniquement), soit de huit images de la même catégorie et d'un « intrus » (un serpent parmi des champignons). Les personnes testées, qui étaient des étudiants, devaient appuyer sur un bouton de leur main gauche si tous les éléments d'une image étaient de la même catégorie, et de leur main droite sur un autre bouton si l'ensemble contenait un intrus.

Nous avons observé que le temps mis à détecter un intrus qui fait peur (un serpent ou une araignée parmi un ensemble de champignons ou de fleurs) est notablement inférieur (voir la figure 2) au temps requis par un intrus anodin (une fleur ou un champignon parmi des serpents ou des araignées). De plus, le temps de détection d'un intrus serpent ou araignée est indépendant du nombre d'objets anodins qui l'entourent, comme s'ils exerçaient une « capture automatique » de l'attention. Ils semblent se « manifester », « jaillir » parmi les objets du fond. Au contraire, quand il s'agit de détecter

une fleur parmi des serpents, le temps de réaction augmente avec le nombre de « stimulus distrayants », c'est-à-dire le nombre de serpents qui entourent la fleur. Dans ce cas, l'intrus ne se manifeste pas, reste tapi parmi les autres, et l'on doit examiner les images les unes après les autres à sa recherche : contrairement à un stimulus effrayant entouré d'objets anodins, on ne le localise pas automatiquement.

Nous avons cherché à savoir ce qui se passerait si nous faisons subir le test à des personnes qui ont la phobie soit des serpents, soit des araignées (mais pas des deux). Occulteraient-elles inconsciemment le stimulus effrayant pour ne pas en prendre conscience, ce qui allongerait le temps de la détection ? Cette réaction ne nous semblait guère probable dans la mesure où, pour survivre dans la nature, nous devons prendre conscience des menaces, et la fonction biologique de la peur est incontestablement de nous tenir à l'écart des dangers. Au contraire, réagiraient-elles encore plus vite que les autres, car elles sont plus sensibles aux stimulus qui déclenchent leur phobie ? C'est effectivement cette seconde réaction que nous avons observée.

Les personnes ayant la phobie des serpents détectent toujours plus rapidement ces animaux (845 millisecondes, contre 915), mais ne détectent pas plus vite les araignées ni les objets anodins (1 050 millisecondes), que les personnes n'ayant aucune phobie (1 060 millisecondes). Les personnes ayant une phobie des araignées détectent, au contraire, l'objet de leur frayeur plus vite que les serpents. Ainsi, nous avons tous une perception exacerbée des stimulus qui nous font peur, tels les serpents et les araignées, et cette sensibilité est encore supérieure chez



Portrait of a woman in a white dress and red sash, looking down with a shocked expression, surrounded by dark, swirling clouds.

1. L'EFFROI qui accompagne la vue des serpents ou des araignées est le signe des phobies (*La folie de Kate*, par Füssli, 1806).

les personnes qui ont la phobie de ces animaux. Cela explique pourquoi, lors de ma recherche de chanterelles, mon attention s'est focalisée sur la vipère.

L'attrait des visages

Ces résultats sont-ils spécifiques des petits animaux, tels les serpents ou les araignées? Pour le savoir, nous avons utilisé dans nos expériences des schémas de visages, caractéristiques des êtres humains. Les visages nous fournissent les informations qui permettent l'identification d'une personne et, de surcroît, grâce aux expressions faciales, nous percevons dans quel état est cette per-

sonne, et quel type d'interaction nous pouvons avoir avec elle. Ainsi réagissons-nous très différemment en présence d'une personne qui a l'air furieux ou, au contraire, qui semble d'humeur joyeuse. En raison, d'une part, de notre patrimoine génétique et, d'autre part, des expériences vécues, les visages menaçants sont des stimulus effrayants presque aussi efficaces que les serpents ou les araignées. De plus, les personnes mal à l'aise en société évitent la présence de ceux qu'ils jugent menaçants ou critiques tout autant que les personnes ayant la phobie des serpents fuient les lieux où elles craignent de rencontrer l'animal redouté, ou même les représentations de cet animal.

Nous avons utilisé des images de visages stylisés : huit visages «neutres» parmi lesquels figurait un intrus, lequel pouvait être un visage hostile ou, au contraire, amical. À nouveau, nous avons mesuré le temps mis pour décider si une série d'images contenait ou non un intrus. Nous avons montré que l'on détecte toujours plus vite un intrus menaçant. De plus, les personnes mal à l'aise en société – qui ont la phobie de leurs pairs – détectent plus vite les visages menaçants et moins vite les visages amicaux, en présence d'un tiers qu'ils présument critique. Ainsi, que ce soit un animal dangereux ou un homme à l'expression menaçante, ces stimulus sont détectés très efficacement.

Karin Mogg et Brendan Bradley, à l'Université de Cambridge, ont montré que l'attention peut être captée par un visage menaçant avant même que la personne testée ne reconnaisse qu'il s'agit d'un visage. Les personnes testées étaient placées devant un écran d'ordinateur où étaient affichés en même temps, mais très brièvement, deux visages, un «neutre» et un exprimant une émotion particulière. On leur demandait d'appuyer sur une touche du clavier d'ordinateur quand un stimulus (un petit triangle) prenait la place du visage de gauche et sur une autre touche quand le triangle était affiché à la place du visage de droite. En comparant les temps de réaction, on détermine la réponse la plus rapide, c'est-à-dire le visage qui capte le plus l'attention des sujets.

En accord avec nos résultats obtenus sur les tâches visuelles, l'équipe de Cambridge a trouvé que les réactions sont plus rapides quand le triangle remplace le visage menaçant, et qu'il n'y a aucune différence entre un visage neutre et un visage amical. Qui plus est, le visage menaçant est «reconnu» même quand il est projeté pendant un temps trop bref (14 milli-secondes) pour être perçu consciemment, et même quand il est masqué, tout de suite après, par un visage d'expression mal définie. Ainsi, le visage menaçant capte l'attention de façon rapide et automatique – de façon instinctive –, avant même toute reconnaissance consciente.

Au milieu des années 1980, mes collègues Ulf Dimberg, F. Esteves et Joaquim Soares, de l'Université d'Uppsala, et moi avons mis au point le procédé de masquage : nous avons montré que des images de visages exprimant



photographies : P. Uman

2. UNE MENACE est rapidement détectée. Pour le montrer, on présente à des volontaires des planches de photographies où un objet anodin (*en haut, la fleur*) est perdu parmi des objets menaçants (les araignées), ou bien où un objet menaçant (*en bas, le serpent*) est entouré d'objets anodins (les fleurs). Le temps mis à détecter l'intrus est plus court quand ce dernier fait peur : il capte automatiquement l'attention.

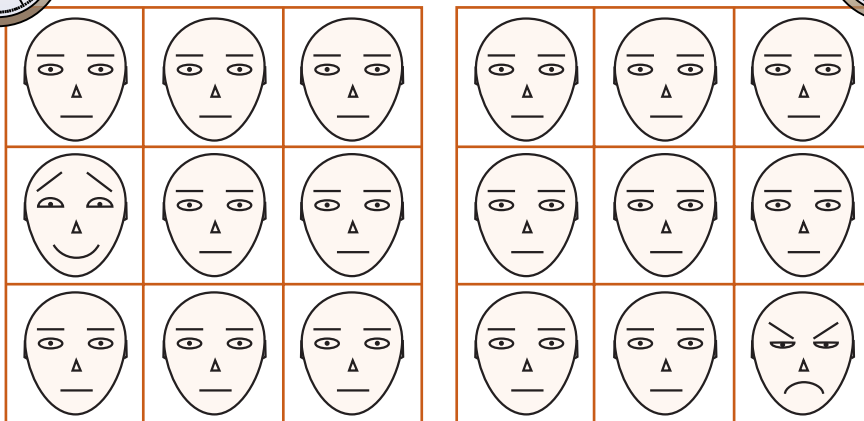
diverses émotions ou des images d'animaux (des serpents ou des araignées) sont masquées efficacement par un stimulus qui cache le premier en moins de 30 millisecondes, c'est-à-dire que le sujet n'a pas le temps de prendre conscience du premier stimulus. Nous nous sommes d'abord demandé si des réactions psychophysiologiques liées à la peur pouvaient être déclenchées par des stimulus masqués de cette façon.

Le procédé de masquage

Quand on présente à des personnes ayant une phobie des serpents ou des araignées des images de la créature redoutée, elles ont une réaction caractéristique : la conductance électrique de leur peau, sur la paume des mains, augmente. Les glandes sudoripares de la paume, sous contrôle du système nerveux autonome, sont activées (contrairement aux autres glandes sudoripares de l'organisme, les glandes de la paume des mains ne semblent pas participer à la régulation de la température corporelle, mais sont activées en cas d'émotion forte). On mesure la conductance en appliquant sur la peau deux électrodes traversées par un courant très faible, indolore : en cas de transpiration, le courant enregistré augmente (la transpiration conduit mieux le courant que l'air), ce qui est une façon simple d'estimer le nombre de glandes sudoripares des paumes activées et, par conséquent, l'activation émotionnelle.

En revanche, cette conductance cutanée reste inchangée quand on présente à ces personnes des images «neutres», ou quand on suit les réactions des personnes qui n'ont pas de telles phobies. De surcroît, face au stimulus redouté, le rythme cardiaque et la pression sanguine augmentent, ce qui confirme l'hypothèse d'un effet contrôlé par le système nerveux sympathique autonome.

Nous avons ensuite cherché si les réactions de peur sont activables par la présentation de stimulus effrayants masqués. Nous avons sélectionné des personnes ayant la phobie soit des serpents, soit des araignées. Nous avons également sélectionné un groupe test indifférent aux araignées et aux serpents. Nous avons exposé les deux types de sujets à des images masquées de serpents, d'araignées, de fleurs et de champignons ; simultanément, nous mesurons leur conductance cutanée. Les stimulus masquants étaient des



3. UN VISAGE MENAÇANT entouré de visages neutres (à droite) est détecté plus rapidement (1 500 millisecondes environ) qu'un visage amical (1 600 millisecondes environ) présenté dans les mêmes conditions (à gauche). La détection du visage hargneux est encore plus rapide chez les personnes qui sont mal à l'aise en société.



4. DES MASQUES constitués de fragments d'images dépourvus de sens (à droite) sont utilisés dans les expériences où l'on étudie les perceptions inconscientes : on projette l'objet intéressant, ici le serpent, pendant un temps trop court pour que la personne testée le voie et on le recouvre d'un masque qui, lui, est perçu consciemment. Bien qu'inconsciente, la perception du serpent déclenche les réactions physiologiques de la peur, par exemple l'accélération du rythme cardiaque.

assemblages aléatoires de fragments des différentes images.

Au préalable, nous avons vérifié la pertinence de la méthode des masques au cours d'une expérience où l'on demandait aux sujets de deviner à laquelle des quatre catégories d'objets appartenait celui qui était présenté juste avant le stimulus masquant. Quand l'intervalle entre le stimulus cible (l'objet à identifier) et le stimulus masquant était inférieur à 30 millisecondes, les résultats étaient totalement aléatoires. Toutefois, le procédé de masquage assurait une réaction différenciée face aux stimulus présentés (serpent, araignée, fleur, champignon) : les personnes redoutant les serpents avaient une conductance cutanée élevée face à des images masquées de serpents, mais pas en présence d'araignées, de fleurs ni de champignons. Face à des araignées, des personnes ayant la phobie de cet animal avaient des réactions physiologiques exacerbées, mais des réactions «nor-

males» et identiques face à des serpents, des fleurs ou des champignons. Les sujets témoins n'avaient pas de réactions particulières vis-à-vis de l'un quelconque de ces stimulus. Ces résultats indiquent que la peur serait activée, de façon inconsciente, par des stimulus qui ne sont pas reconnus consciemment.

Mes collègues ont récemment prolongé ces résultats. Ils ont enregistré les réactions des muscles faciaux de personnes exposées brièvement (30 millisecondes) à des visages : on leur demandait de reconnaître un visage exprimant une émotion particulière (le stimulus cible) parmi des visages neutres (les stimulus masquants). Après de nombreux tests, U. Dimberg a montré que les muscles zygomatiques (qui relient les commissures des lèvres aux pommettes) des personnes à qui l'on présente des visages heureux sont activés, comme s'ils s'apprêtaient à répondre au sourire. Au contraire, quand le stimulus

cible est un visage agressif, c'est le muscle qui assure le froncement des sourcils qui est activé. Ces muscles sont activés même lorsque les visages réjouis ou hargneux ne sont présentés que très brièvement et qu'ils sont masqués par des visages inexpressifs. Ces diverses expériences ont confirmé que des stimulus qui ne sont pas reconnus consciemment déclenchent des réactions émotionnelles spécifiques.

L'intérêt du conditionnement

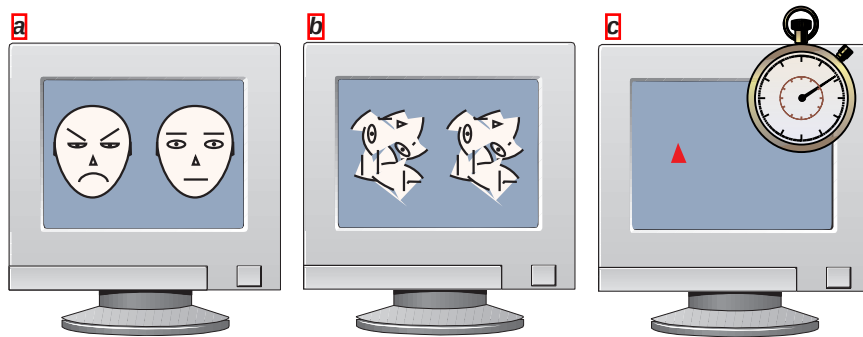
D'autres expériences ont révélé que l'on peut conditionner des personnes à certains stimulus. Le chien de Pavlov était conditionné au son de la sonnerie qui déclenchait sa salivation, même en l'absence de nourriture. Ici, on présente à une personne deux images différentes, par exemple une image de serpent et une autre d'araignée, et la présentation du serpent est suivie d'un stimulus désagréable, par exemple un léger choc électrique sur les doigts ; on constate que la personne testée réagit davantage (sa conductance cutanée augmente davantage) aux serpents qu'aux araignées. Les personnes «conditionnées» par un choc électrique aux stimulus effrayants sont plus efficacement conditionnées que les personnes que l'on essaie de conditionner à la vue d'une fleur. Le conditionnement est plus efficace : la conductance cutanée augmente davantage, et cette augmentation persiste plus longtemps que lors d'un conditionnement à des images neutres, lequel «s'éteint» rapidement.

Cet effet de stimulus inconditionnel (le serpent ou la fleur) sert souvent à «prouver» que l'homme a acquis une aptitude biologique à avoir peur des stimulus qui ont constitué une menace répétée au cours de l'évolution. Si cette interprétation est correcte, on postule que l'apprentissage de la peur des serpents passe par le cerveau primitif, apparu au cours de l'évolution bien avant les régions les plus élaborées du cerveau humain, lesquelles assurent la perception consciente des stimulus.

On a ensuite supposé que l'on pouvait déclencher le même type de réflexe conditionné avec des stimulus masqués, c'est-à-dire qui ne sont pas reconnus consciemment. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons conditionné une personne aux serpents en présentant l'animal même temps que l'on appliquait un léger choc électrique ; on présentait le serpent pendant un temps trop bref pour qu'il soit reconnu consciemment et on le masquait par une image dénuée de sens. On constate que les réponses conditionnées aux serpents sont déclenchées même quand les stimulus sont masqués. Toutefois, des réactions autonomes conditionnées sont déclenchées par des stimulus masqués, à condition que ces derniers fassent partie de la catégorie «effrayante», c'est-à-dire que ce soit des serpents, des araignées ou des visages agressifs. Même si l'on peut obtenir des réactions conditionnées à des stimulus anodins (fleurs, champignons, visages joyeux), elles ne se manifestent plus quand ces stimulus sont masqués.

Au cours d'une autre série d'expériences, nous avons confirmé que les réactions aux stimulus masqués peuvent être conditionnées : on peut «apprendre» à percevoir le danger, sans en avoir conscience. Nous avons présenté à des volontaires des images de serpents et d'araignées masquées par des images brouillées, et nous avons appliqué un léger choc électrique uniquement après la projection des serpents. Malgré cet aspect systématique, les sujets ne distinguaient pas consciemment les serpents masqués des araignées masquées et, pourtant, ils ont appris à réagir davantage aux images masquées associées à un choc : la conductance cutanée augmentait davantage après la présentation des serpents masqués. Des résultats comparables ont été obtenus avec des visages menaçants.

Les sujets testés étaient conditionnés au serpent masqué, alors même qu'ils étaient incapables de dire si l'image projetée était un serpent ou une araignée. Force nous a été de constater qu'ils tiraient une sorte d'«information» inconsciente du stimulus masqué, lequel guidait leur prévision consciente d'un choc. Au cours d'une des expériences, on leur demandait d'indiquer, au moyen d'un levier qu'ils tenaient dans la main droite, s'ils allaient recevoir un choc électrique : alors qu'ils n'avaient aucun moyen objectif de savoir que l'on ne déclenchait le choc qu'avec le serpent et qu'ils ne distinguaient ni les serpents ni les araignées, ils prévoyaient plus souvent qu'ils allaient recevoir un choc après le stimulus masqué qui, lors du conditionnement, était associé à un choc qu'après un stimulus masqué non associé à un choc. Comme si le conditionnement avait amélioré leur «clairvoyance» pour le choix suivant. Leur prévision serait ainsi améliorée par une information sensorielle (par exemple, l'accélération du rythme cardiaque) déclenchée par la réaction conditionnée aux stimulus masqués associés à un choc. Ils auraient ressenti des «impressions» différentes durant l'épreuve où le stimulus masqué est associé à un choc et durant celle où le stimulus masqué n'est pas associé à un choc : le stimulus associé à un choc déclenche une réaction conditionnée autonome qui «renforce» le circuit de la perception inconsciente. Les personnes qui ont une perception inconsciente – ou perception autonome – très efficace établiraient un lien entre



5. DES IMAGES dont on n'a pas conscience sont perçues par l'organisme : au cours de cette expérience, on projette sur un écran d'ordinateur un visage menaçant et un visage neutre (a). La présentation est trop brève pour que la personne testée ait conscience de ce qu'elle voit : les visages sont rapidement remplacés par des images constituées de fragments de visages (b). Seule l'image masquante est perçue consciemment. Puis on fait apparaître un nouveau stimulus, un triangle rouge (c). On demande d'appuyer très vite sur la touche rouge si le triangle est projeté à la place de l'image de gauche ou sur la touche verte s'il est projeté à la place de l'image de droite. Les sujets appuient plus vite sur la touche qui correspond à l'emplacement du visage agressif que sur la touche qui correspond à l'emplacement du visage neutre. On en déduit que le visage agressif, même masqué, capte l'attention bien qu'il ne soit pas reconnu consciemment.

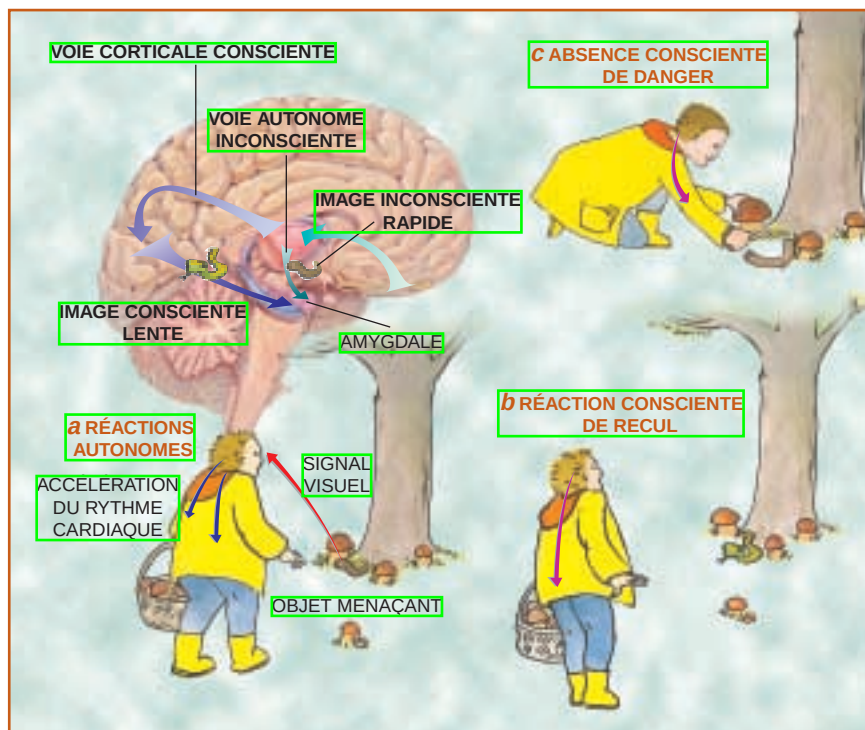
certaines modifications corporelles et les chocs qui les ont précédées.

Ainsi les réactions autonomes liées à la peur peuvent être enregistrées et déclenchées par des stimulus dont on n'a pas conscience. Les stimulus effrayants captent l'attention et déclenchent des réactions de frayeur, sans que l'on en ait conscience. En d'autres termes, si nous avons été conditionnés (nous avons, par exemple, enduré une première expérience désagréable), nous «reconnaissons» le stimulus dangereux avant même d'en avoir conscience et même s'il est fugace, c'est-à-dire qu'il est masqué par un autre stimulus anodin : nous aurons acquis une sorte de réflexe conditionné déclenché par le stimulus masqué, qui active les circuits de la peur et qui notamment prépare l'organisme à la fuite ou au combat.

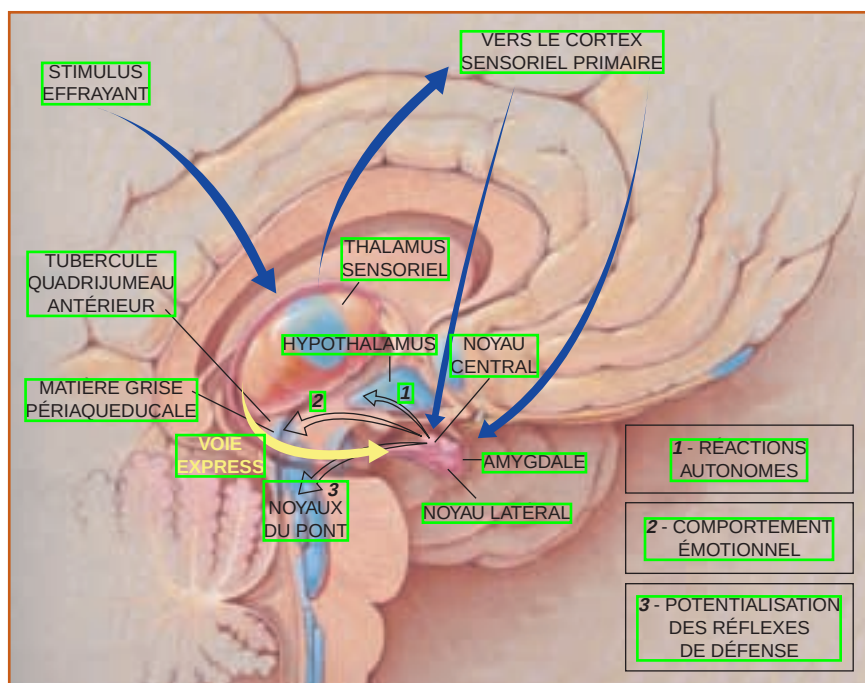
Le rôle de l'amygdale

Ces résultats concordent avec ceux que Joseph LeDoux, de l'Université de New York, Michael Davis à l'Université d'Emory et Michael Fanselow à l'Université de Los Angeles ont décrits chez le rat : les noyaux amygdaliens sont les éléments principaux du circuit cérébral de la peur. Des fibres nerveuses relient le noyau amygdalien central à l'hypothalamus latéral : elles commandent les réactions autonomes ; d'autres, reliées à la matière grise périaqueducale du cerveau moyen, commandent les comportements liés à la peur, c'est-à-dire l'immobilisation, puis l'attaque ou la fuite ; enfin des connexions entre le noyau amygdalien central et des noyaux localisés dans le tronc cérébral contrôlent les réflexes de défense et les expressions faciales. Le noyau amygdalien latéral et le noyau basolatéral, qui évaluent le contenu émotionnel des stimulus, reçoivent des afférences en provenance de plusieurs aires corticales, c'est-à-dire des informations visuelles déjà traitées, en provenance des aires temporales inférieures.

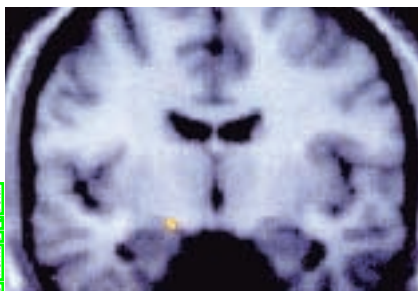
D'après J. LeDoux, des informations peu élaborées issues des noyaux thalamiques atteignent le noyau latéral de l'amygdale, qui jouerait un rôle essentiel dans l'activation de la peur. Cette voie, des noyaux thalamiques vers le noyau latéral de l'amygdale, serait une «voie express» qui permettrait une activation rapide des défenses, avant même que le stimulus effrayant n'ait été identifié. Cette organisation des



6. UNE ATTENTION FOCALISÉE, par exemple sur les champignons, est inconsciemment détournée par un objet qui semble menaçant. Avant même que le promeneur ait pris conscience de ce qui se passe, une voie cérébrale «automatique» alerte l'organisme qui se fige, et les mécanismes de défense (par exemple, l'accélération du rythme cardiaque et la préparation des muscles à la fuite) se mettent en place (a). Toutes ces réactions sont activées par une voie cérébrale autonome très rapide (en vert, sur le cerveau) qui ne requiert aucun traitement conscient des informations. Puis la voie consciente, plus lente (en violet, sur le cerveau), prend le relais : quand l'information visuelle est traitée et que le promeneur prend conscience de la nature de l'objet, ou bien il recule prudemment, car l'objet est une vipère (b), ou bien l'objet n'est qu'une branche morte, et la cueillette des champignons continue (c).



7. UN STIMULUS effrayant atteint le thalamus, lequel transmet par la «voie express» une information brute à l'amygdale. Simultanément l'information est envoyée vers le cortex, où elle est traitée. L'amygdale active l'hypothalamus latéral (voie 1), qui contrôle les réactions autonomes (l'augmentation de la conductance cutanée) ; elle active aussi la matière grise périaqueducale (voie 2) qui commande le comportement émotionnel (l'immobilisation, la fuite...) ; enfin les noyaux du pont notamment (voie 3), qui activent les réflexes de défense.



8. L'IMAGERIE CERVEbraLE, ici la tomographie par émission de positons, permet la visualisation des aires activées lors de certaines tâches mentales spécifiques. On présente au sujet étudié des visages agressifs masqués ou non par un visage neutre ; dans certains cas, la personne étudiée a préalablement subi un conditionnement vis-à-vis des visages agressifs. On constate que, chez les personnes ayant subi un conditionnement, l'amygdale droite (à droite) est activée quand on présente des visages agressifs masqués, tandis que c'est l'amygdale gauche (à gauche) qui est activée quand les visages agressifs ne sont pas masqués : les stimulus non masqués sont accessibles à la conscience et activent l'amygdale gauche. Inversement, les images masquées, perçues inconsciemment activent l'amygdale droite.

afférences des noyaux amygdaliens est vitale, car, d'un point de vue évolutif, il est moins coûteux d'activer les circuits de la peur, même en cas de fausse alerte, que de ne pas réagir face à ce qui pourrait être une vraie menace.

Cette notion de voie express qui mène aux noyaux amygdaliens éclaire certains de nos résultats. Si l'amygdale évalue le contenu émotionnel d'un stimulus, cette voie directe peu élaborée serait celle que suivent les messages assurant la commutation automatique de l'attention vers les stimulus effrayants. D'autres résultats montrent que le procédé de masquage perturbe le traitement cortical des stimulus visuels bien avant que le stimulus traité ne soit identifié dans le lobe temporal inférieur. Des informations incomplètement traitées concernant le stimulus visuel atteignent l'amygdale par la voie express, et l'amygdale, à son tour, active les réactions autonomes par l'intermédiaire de l'hypothalamus latéral et du tronc cérébral. Ainsi, la peur serait déclenchée par les signaux effrayants qui atteignent l'amygdale, l'aboutissement de la voie express, laquelle véhicule les signaux visuels non traités par le cortex. L'amygdale capte automatiquement les informations visuelles qui indiquent la présence possible d'un serpent ; immédiatement, les mécanismes de défense, telle l'immobilisation, sont activés avant même que le stimulus ne prenne une représentation consciente grâce au traitement par le cortex.

Chez les personnes ayant une phobie des serpents, le circuit de la peur, centré sur l'amygdale, serait hypersensibilisé, vraisemblablement à cause d'une vulnérabilité génétique et d'expériences vécues désagréables qui ont

imprimé une peur des serpents. En raison de cette sensibilité exacerbée, les serpents déclenchent automatiquement une frayeur démesurée, avant même que le stimulus de la phobie ne soit consciemment reconnu.

A-t-on des preuves directes de l'activation des circuits de la peur chez l'homme ? John Morris et Ray Dolan, du Laboratoire *Wellcome* de neurologie cognitive, à Londres, ont utilisé la tomographie par émission de positons pour visualiser les réactions du cerveau humain à des stimulus effrayants masqués. Avant de subir l'examen, les personnes testées subissaient un conditionnement où on leur présentait deux visages en colère et deux visages neutres. Un des visages agressifs servait de stimulus inconditionnel, car il était suivi par un bruit intense et désagréable. Lors de la tomographie, on leur présentait, par exemple, un visage agressif masqué par un visage neutre ; ou bien le même visage agressif masqué par un visage neutre, mais qui avait été, lors d'un conditionnement préalable, suivi par un bruit désagréable. Dans d'autres expériences, on présentait d'abord les visages neutres, puis les visages en colère non masqués.

On a ainsi montré que l'amygdale était manifestement activée quand on présentait au sujet conditionné des visages agressifs. Quand ces visages étaient masqués, seule l'amygdale droite était activée. Au contraire, quand les visages agressifs inconditionnels n'étaient pas masqués, seule l'amygdale gauche était activée. Ainsi, comme on le supposait d'après l'étude des modèles animaux, les amygdales jouent un rôle essentiel dans l'activation des réactions conditionnées à la

peur. Bien que nous n'ayons pas prévu la latéralisation de l'activation de l'amygdale en présence de stimulus masqués, cette asymétrie semble, *a posteriori*, tout à fait plausible, puisque les aires du langage, qui font certainement partie des mécanismes de reconnaissance conscients, sont localisées dans l'hémisphère gauche (l'amygdale gauche est activée lors de la présentation de stimulus non masqués, donc accessibles à la conscience).

L'imagerie cérébrale

Ainsi, en comparant les modifications des débits sanguins cérébraux, on a mis en évidence, d'une part, l'effet du conditionnement sur les stimulus inconscients masqués (activation de l'amygdale droite) et, d'autre part, les réactions du cerveau face à des stimulus inconditionnels conscients (activation de l'amygdale gauche).

Afin de découvrir quelle est la structure cérébrale responsable de l'activation inconsciente des noyaux amygdaliens, nous avons étudié, avec J. Morris et R. Dolan, s'il existait des relations privilégiées entre les noyaux amygdaliens et d'autres structures cérébrales durant la présentation masquée de visages agressifs. Nous avons montré que l'activation du noyau amygdalien droit est liée à celle de deux structures des voies optiques, le tubercule quadrijumeau antérieur, une structure cérébrale proche du thalamus, et le pulvinar droit, du noyau thalamique. En revanche, on n'a mis en évidence aucun lien entre l'activation de l'amygdale et celle du cortex. Le tubercule quadrijumeau antérieur et le pulvinar font partie d'un système de projection visuelle qui réagit aux éclats lumineux et aux mouvements ; il est constitué de grands neurones qui conduisent rapidement l'information et sont, de ce fait, moins sensibles à l'effet de masquage que les neurones plus petits et plus lents qui enregistrent les longueurs d'onde des stimulus de longue durée, et se projettent sur le corps genouillé latéral et sur le cortex visuel primaire. La voie du tubercule quadrijumeau antérieur et du pulvinar est sensible aux mouvements des yeux et est dédiée à la commande de l'attention spatiale visuelle.

Ainsi, les informations visuelles seraient partagées entre les voies optiques, constituées de neurones lents, qui mènent au cortex et fournissent les images conscientes, et un circuit

visuel inconscient, constitué de neurones rapides imprécis ; ce dernier met en jeu le tubercule quadrijumeau antérieur, le pulvinar, les noyaux thalamiques et le noyau amygdalien latéral. Ces données expliquent en partie la capture automatique de l'attention par les stimulus effrayants, et l'activation inconsciente des circuits de la peur.

Nos résultats ont inversé l'ordre des opérations lors du traitement de l'information émotionnelle. On admettait que l'activation des réactions corporelles précède et contrôle l'expérience consciente des émotions ; nous avons montré que l'attention et l'activation corporelle résultent d'un traitement incomplet des stimulus effrayants. Quand un tel stimulus devient conscient, diverses activations corporelles qui donnent sa connotation émotionnelle à l'expérience se sont déjà produites : le traitement conscient intervient peu dans l'activation de la peur, il ne fait que donner une interprétation et un sens à l'épisode qui l'a déclenchée.

Diverses données indiquent que des facteurs génétiques de vulnérabilité interviennent dans les phobies. Lors d'un épisode de conditionnement suffisamment intense et traumatisant, un stimulus peut acquérir la propriété de suractiver le circuit de la peur. Ce circuit est inaccessible à la conscience, de sorte que les personnes qui ont des phobies ne peuvent les vaincre par le raisonnement. La compréhension des mécanismes des phobies devrait en améliorer le traitement.

Arne ÖHMAN est professeur de psychologie dans le département des neurosciences cliniques de l'Institut Karolinska de Stockholm.

J.S. MORRIS, A. ÖHMAN et R.J. DOLAN, *Conscious and Unconscious Emotional Learning in the Human Amygdala*, in *Nature*, vol. 393, pp. 467-470, 1998.

J.S. MORRIS, A. ÖHMAN et R.J. DOLAN, *A Subcortical Pathway to the Right Amygdala Mediating «Unseen» Fear*, in *Proceedings of the National Academy of Science*, vol. 96, pp. 1680-1685, 1999.

A. ÖHMAN, A. FLYKT et L. LUNDQVIST, *Unconscious Emotion : Evolutionary Perspectives, Psychophysiological Data, and Neuropsychological Mechanisms*, in *The Cognitive Neuroscience of Emotion*, sous la direction de R. Lane et L. Nadel, pp. 296-327, Oxford University Press, 2000.

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



LES SECRETS DE LA CASSEROLE

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



RÉVÉLATIONS GASTRONOMIQUES

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

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

LA CASSEROLE DES ENFANTS

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

Code 2309-80 F-128 pages



BELIN

Voir bon de commande page 98

Expansion et recul des forêts équatoriales

DOMINIQUE SCHWARTZ

L'homme est-il un prédateur des forêts ? Une reconstitution de la progression et du recul des forêts et des savanes équatoriales a nuancé cette accusation simpliste : les variations climatiques sont prépondérantes.

Dans l'imaginaire collectif, les forêts équatoriales seraient immuables, car des températures et une humidité élevées y régneraient en permanence. On entend parfois dire, en contradiction, que l'homme détruit les forêts. Ces deux points de vue sont erronés. En analysant les sols et les sédiments d'Afrique centrale et d'Amazonie, nous avons reconstitué l'histoire des formations végétales et déterminé l'effet des facteurs climatiques et humains.

Au début de l'Holocène (vers 10 000 ans avant notre ère), le climat était plus humide que pendant la période glaciaire précédente. Aussi la forêt équatoriale avait-elle recouvert presque toute

l'Afrique centrale et l'Amazonie. Depuis, des savanes sont apparues dans des zones sèches, soit en périphérie des forêts, soit à l'intérieur, puis certaines ont disparu. Ces alternances résultent de variations climatiques globales (longueur de la saison sèche, ensoleillement, pluviométrie...) et des fluctuations locales d'humidité (quantité d'eau arrivant au sol, évaporation et prélèvement par les plantes, écoulements d'eau infiltrée ou ruisselant en surface, nappes phréatiques...). Il existe ainsi un seuil de pluviométrie au-dessous duquel la savane remplace la forêt.

Au Congo, où la saison sèche, fraîche et nuageuse, dure quatre à cinq mois, ce seuil de pluviométrie est environ de

1 100 millimètres par an ; au Cameroun, où la saison sèche est chaude et ensoleillée, cette limite annuelle se situe vers 1 400 millimètres par an.

L'ampleur et la rapidité du remplacement de l'un des deux écosystèmes par l'autre dépend de l'écart entre la pluviométrie locale et le seuil de transition. Dans une région dont la pluviométrie est de 3 000 millimètres par an, une diminution des pluies de 1 000 millimètres ne fera pas basculer l'écosystème vers la savane. En revanche, si la pluviométrie de départ est de 1 400 millimètres par an, une baisse de 400 millimètres sera suffisante. Les zones les plus sèches sont perturbées en premier, et plus fortement.

1. CETTE FORET EQUATORIALE du Congo n'est pas immuable. Depuis 12 000 ans, elle a progressé ou reculé par rapport à la savane.

Nous avons reconstitué la progression et le recul des forêts et des savanes équatoriales dans le cadre du programme ECOFIT (Écosystèmes et paléocosystèmes des forêts intertropicales), lequel doit préciser l'impact des facteurs climatiques et humains sur la diversité de la flore et de la faune, afin de prévoir le comportement futur de ces écosystèmes et d'optimiser leur gestion.

L'équipe internationale d'ECOFIT, dont nous faisons partie, analyse les sols et les sédiments (voir l'encadré des pages 64 et 65) de différents sites représentatifs des mécanismes du climat équatorial en Afrique centrale (Sud du Congo, Gabon et Cameroun, voir la figure 2) et en Amazonie (Guyane, Brésil et Bolivie). Les chercheurs ont aussi mesuré la quantité de feuilles et le nombre d'arbres par classe de diamètre à partir de photos prises par satellite. En outre, ils ont modélisé l'écosystème forestier équatorial.

La reconstitution des anciennes végétations

Aujourd'hui, en Afrique centrale, la forêt et la savane coexistent jusque sous l'équateur. Les savanes se trouvent dans des zones sèches, telles les vallées du Niari, au Congo, de la Nyanga et de la Lopé, au Gabon, ou dans des zones où le sol est sableux et sec, tels le littoral et le pays Batéké, au Congo. Pour déterminer quand et comment elles sont apparues, les chercheurs analysent et datent les restes des végétations passées.

Annie Vincens et Hilaire Elenga (CEREGE) ont travaillé sur les pollens anciens (voir l'encadré de la page 64), conservés dans les sédiments et caractéristiques des espèces ou des familles de plantes. À l'Holocène inférieur et moyen (de - 8000 à - 2000), à la place de la savane actuelle, une forêt marécageuse existait à Songolo et Coraf, et une forêt à caractère semi-

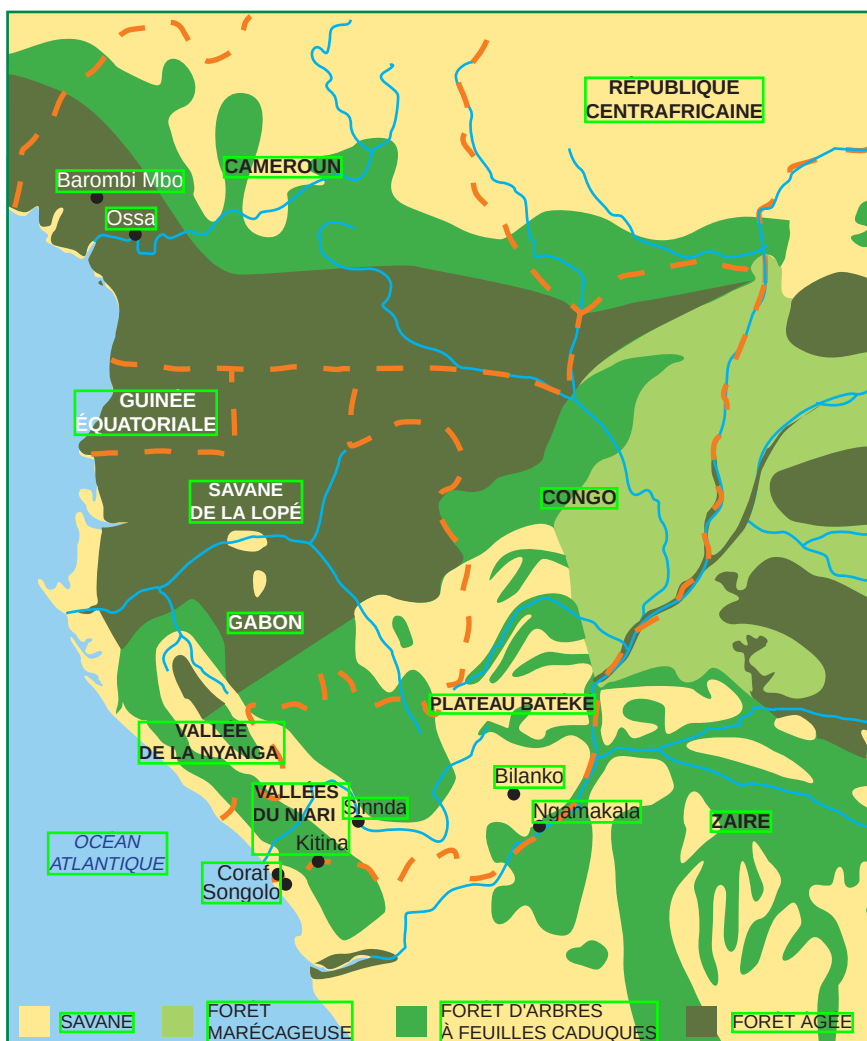
décidu (dont la majorité des arbres perdent leurs feuilles de façon saisonnière) poussait à Sinnda, Bilanko et Ngamakala. En revanche, à Kitina, Barombi Mbo et Ossa, le cœur de la forêt, verte toute l'année, était entouré d'une ceinture de forêt marécageuse, comme c'est encore le cas aujourd'hui. La forêt recouvrait alors toute l'Afrique centrale. Les mesures des rapports isotopiques de carbone 12 et 13 (voir l'encadré de la page 65) ont confirmé cette découverte.

Puis, à l'Holocène supérieur (vers - 2000), la végétation a changé, des savanes remplaçant localement la forêt. Dans les régions qui sont restées forestières, la proportion de plantes héliophiles (qui ont besoin de beaucoup de soleil) a augmenté, ce qui indique que la forêt s'est clairsemée. Dans les régions initialement très humides, ces changements ont été limités et plus tardifs. Dans les régions où les conditions climatiques étaient proches du seuil de transition entre forêt et savane, les changements ont été précoces et drastiques.

Autour des lacs Sinnda et Kitina, au Sud du Congo, les flux sédimentaires (quantités de sédiments déposés par unité de temps), mesurés par Jacques Bertaux et ses collègues (IRD, Bondy), ont commencé à diminuer simultanément, vers - 3500. Dans les zones forestières comme celles où se trouvent ces lacs, ces flux ne sont créés par l'érosion que lors des fortes pluies. La région a ainsi connu une période de sécheresse et, autour du lac Sinnda, la proportion de plantes à feuilles caduques a augmenté dès - 3400. Vers - 1900, la savane a complètement remplacé la forêt, et le lac s'est asséché. Autour du lac Kitina, à moins de 100 kilomètres du précédent, la végétation n'a réagi que vers - 800 au changement climatique qui avait commencé vers - 3500 : seules quelques savanes sont apparues à l'intérieur de la forêt.

Le retour à des conditions climatiques plus humides a commencé entre 500 et 700, avec un court intermède sec vers 1400. Depuis 1500, la forêt gagne du terrain sur la savane. De nouvelles forêts se forment par aggrégation de bosquets d'arbres fruitiers abandonnés, et avec des arbres pionniers poussant notamment sur les termitières, où le sol meuble favorise la germination des plantes.

Après cette reconstitution du paysage africain, examinons l'Amazonie,



2. LORS DE LA PÉRIODE DE SÉCHERESSE, dont le début date de 3500 avant notre ère, les savanes ont gagné du terrain sur les forêts, qui recouvraient auparavant toute l'Afrique centrale. Aujourd'hui, les savanes alternent avec les forêts.

où plusieurs périodes de sécheresse intense se sont succédé durant l'Holocène. Les dunes de sable fossile en Bolivie, au bord du Roraima et peut-être du Rio Negro, au Brésil, en témoignent : elles ne se forment que dans des zones dépourvues de végétation, par l'érosion éolienne.

Pendant ces périodes de sécheresse, la forêt a localement disparu : les rapports isotopiques en carbone 12 et 13 indiquent que les régions forestières les plus sèches d'Amazonie étaient recouvertes de graminées, plantes typiques des savanes.

Les charbons de bois (*voir l'encadré des pages 64 et 65*), reliques des feux passés, témoignent aussi de périodes sèches. En Amazonie, ils abondent dans des zones actuellement

humides où aucun feu ne pourrait aujourd'hui se déclencher. Au Brésil, les charbons de bois sont présents dans des sédiments datant de l'Holocène moyen (autour de -3000) ; en Guyane, ils appartiennent à trois périodes : de - 8000 à - 6000, de - 4000 à - 2000 et de 0 à 600. Les incendies des deux premières périodes sont probablement naturels, car ils précèdent le peuplement de la région de plusieurs millénaires et, *a fortiori*, les débuts de l'agriculture : des 275 sites préhistoriques d'habitats humains repérés dans la région de Petit-Saut, aucun n'est plus ancien que - 100.

En Guyane, l'analyse des pollens montre que la forêt était diversifiée et humide entre - 1000 et 0. Ensuite, deux périodes sèches se sont succédé entre

300 et 800 et entre 1100 et 1400. Pendant ces périodes, la fréquence des sécheresses courtes a probablement augmenté : elles seraient apparues tous les 10 à 30 ans et auraient augmenté la proportion de plantes héliophiles sans créer de nouvelles savanes. Ces intermèdes de sécheresse fréquents empêchaient la régénération des forêts en favorisant la propagation des feux (notons que les feux sont un élément normal du fonctionnement des écosystèmes forestiers).

Les terrasses alluviales retracent l'alternance des périodes sèches et humides : pendant les premières, les faibles débits font que les alluvions se déposent dans le lit des rivières ; avec le retour de l'humidité, les rivières creusent un lit dans les anciens alluvions,



3. CE PALMIER (*Astrocaryum sciophilum*) pousse dans la forêt guyanaise (*en haut à gauche*). Pendant les périodes de sécheresse, il a disparu, sauf dans le fond humide des vallées ; ensuite, il a lentement remonté le long des versants. Sa répartition est un marqueur des variations climatiques passées, car ses lourdes graines ne sont pas transportées, ni par le vent, ni par les animaux. En haut à droite, cette savane herbacée de l'Est du Cameroun est lentement reconquise par la forêt, comme l'indiquent les petits arbustes héliophiles qui y poussent. En bas, cette savane, incluse dans la forêt, témoigne d'un assèchement climatique passé qui a fait reculer la forêt. Elle s'est maintenue, à cause des feux pratiqués par les chasseurs.





4. LES FEUX DE BROUSSE (a), régulièrement allumés par les chasseurs pour rabattre le gibier, ne détruisent pas la forêt. Ils assèchent seulement le feuillage sur quelques mètres, au voisinage des lisières.

mais brûlent les arbustes des savanes, les premiers éléments d'une forêt potentielle. Les habitants de la forêt la défrichent pour cultiver la terre (b). Cependant, la forêt remplace rapidement les friches lais-

constituant ainsi des «terrasses» sur-
élevées de chaque côté.

Les alizés, causes des variations de climat

Quelle est la cause des variations climatiques induisant des changements de végétation? Vers - 4000, la superficie de la forêt était encore maximale en Afrique centrale, alors qu'elle avait déjà diminué en Amazonie. La situation s'est inversée entre - 1000 et 0. Les variations d'intensité des alizés seraient responsables de ces changements climatiques en opposition de phase : l'alizé boréal (venant du pôle Nord) s'assèche en traversant le Sahara. Lorsqu'il est puissant, il bloque la remontée de l'air humide venant du golfe de Guinée, ce qui provoque des sécheresses en Afrique de l'Ouest, puis il renforce les alizés qui se chargent de vapeur d'eau au-dessus de l'océan Atlantique, avant d'arroser l'Amazonie. Lorsque l'alizé boréal est faible, la mousson remonte sur le Congo, le Gabon et le Cameroun, mais les alizés qui arrivent alors en Amérique du Sud sont moins puissants et n'arrosent pas beaucoup l'Amazonie, où sévit la sécheresse. Les simulations climatiques, qui montrent que l'alizé boréal était faible vers - 4000, semblent confirmer ce mécanisme. De plus, la présence de diatomées (voir l'encadré des pages 64 et 65) d'origine saharienne dans des lacs du Sud du Cameroun indique que l'alizé boréal qui les a transportées était fort vers - 800.

La végétation a réagi selon les conditions initiales de climat et d'humidité. En Afrique centrale, elle a mis

plusieurs siècles, voire plusieurs millénaires, à se transformer après l'assèchement qui a commencé vers - 3500 : ce retard est dû à la baisse relativement lente des précipitations dans des régions où il pleuvait auparavant beaucoup.

En Amazonie guyanaise, la végétation semble avoir changé très vite après des successions de sécheresses, d'abord déclenchées par l'alizé. Ensuite, la fréquence des épisodes secs de type El Niño (dû à un courant chaud le long des côtes du Pérou, qui influence le climat global) ou dus à la remontée d'air froid venant du pôle Sud a probablement augmenté (de tels événements, fréquents aujourd'hui, font parfois descendre la température jusqu'à 10 °C sous l'équateur, pendant la journée). La lente tendance à l'assèchement en Afrique centrale et les sécheresses passagères en Amazonie ont eu des répercussions différentes sur la végétation.

Les espèces à petites graines sont facilement dispersées par le vent et la faune. La période juvénile de ces espèces pionnières étant courte, elles envahissent rapidement l'espace, alors que les espèces à graines lourdes, qui tombent au pied des arbres, ont une période juvénile longue, et leur vitesse de progression est plus lente.

En Guyane, la forêt se ressent encore du dernier épisode sec, qui date de 1400 : elle est riche en essences à dispersion rapide, qui ont succédé aux plantes héliophiles pionnières, lesquelles ont poussé au début de la reconquête de la forêt. Les plantes à dispersion lente apparaissent lors de l'étape finale de reconquête. Dans

la forêt guyanaise ces plantes sont encore jeunes, comme le montrent leurs diamètres, mesurés sur les images satellites.

En Afrique centrale, la forêt gabonaise clairsemée de marantacées, des plantes de sous-bois, et les forêts congolaises presque exclusivement constituées d'okoumés, une sorte d'acajou, procèdent de cette dernière étape de reconquête.

En Amazonie, l'espèce *Eperua falcata*, un grand arbre de forêt marécageuse, reconquiert lentement les versants à partir des talwegs (le fond des vallées). Les analyses de charbons de bois de Christophe Tardy et Pierre Charles-Dominique (MNHN, Brunoy) montrent que cet arbre occupait ces versants il y a quelques milliers d'années : il a donc localement disparu pendant les phases de sécheresse. La progression du palmier *Astrocaryum sciophilum* (voir la figure 3) est encore plus lente (quelques centaines de mètres en 600 ans). L'analyse de ces reculs et de ces lentes progressions permet de reconstituer l'histoire du climat local.

Lors des épisodes de sécheresse, certaines espèces disparaissent localement. En Malaisie, la biodiversité de la forêt est plus grande qu'en Guyane : le relief montagneux malais attire des précipitations abondantes, favorables à la végétation, alors que les sécheresses en Guyane à l'Holocène ont fait disparaître de nombreuses espèces. La forêt malaise est 15 fois plus riche en espèces à dispersion lente que la forêt guyanaise.

En Afrique, les bégonias, des plantes de sous-bois qui poussent sur des



sées par l'agriculture traditionnelle. L'homme contribue aussi à la progression de la forêt : les arbres fruitiers qui entourent les villages et pâturages (c) s'agrègent parfois avec d'autres bosquets de la savane



et donnent naissance à de nouvelles forêts. La réaction de la végétation dépend de la proximité des agglomérations. Autour de ce village africain (d), les activités humaines ont causé l'apparition de savanes.

rochers humides et moussus dans les talwegs, essaient difficilement. Certaines régions du Gabon ou du Congo sont très riches en espèces de bégonias différentes, alors que d'autres, dont les conditions semblent identiques, en sont totalement dépourvues. Les premières correspondraient aux zones où la forêt s'est maintenue tout au long de l'Holocène, et les secondes aux zones où elle a temporairement disparu.

La reconquête de la savane par la forêt

Quelles sont les zones où la forêt a subsisté, aux périodes froides et sèches, pendant toute la durée de l'Holocène? Comment la forêt a-t-elle reconquis son territoire à partir de refuges forestiers?

La biodiversité des forêts est un indicateur de sa pérennité. Les refuges forestiers, où la biodiversité est importante, sont distants de plusieurs centaines de kilomètres. Youta Happi (Université de Yaoundé) et Aline Fabing (CEREG, Strasbourg) ont évalué les vitesses de progression des forêts en mesurant d'abord les cernes concentriques des sections de troncs d'arbre (l'épaisseur des cernes indique la vitesse à laquelle l'arbre a poussé et les conditions climatiques du moment, car on a établi des échelles chronologiques applicables aux arbres d'une même espèce). Cette vitesse de progression a aussi été déterminée en mesurant les rapports isotopiques dans le carbone du sol, en évaluant le temps moyen de résidence des matières organiques dans le sol (datation au carbone 14) et en photographiant les limites forêt-

savane par avion et satellite : cette limite se déplace d'environ 20 à 200 mètres par siècle.

Ces vitesses ne sont pas suffisantes pour expliquer la reconquête actuelle de la forêt à partir des seuls refuges forestiers, car ceux-ci sont trop distants. On a supposé l'existence de micro-refuges, tels des bosquets et des galeries forestières le long des cours d'eau, à partir desquels la forêt aurait progressé. La modélisation de cette hypothèse, par Marc Dubois et ses collègues (CEA, Saclay) est compatible avec les vitesses précédentes et la morphologie des limites forêts-savanes.

Depuis l'Holocène inférieur, l'homme occupe la forêt équatoriale. Ses activités ont un effet sur la végétation, qui s'ajoute aux facteurs naturels.

Par le passé, l'homme a plus accompagné que causé les changements de végétation. En Afrique centrale, la savane a occupé une superficie maximale entre - 500 et 0. Plus facile à franchir que la forêt, elle a probablement favorisé la diffusion de la métallurgie du fer, qui s'est propagée du Cameroun au Congo, entre - 450 et - 100, ainsi que les migrations des peuples qui l'employaient.

Sur le plateau Batéké, la forêt occupe aujourd'hui dix pour cent de l'espace. Elle aurait suffi à alimenter les fourneaux des fondeurs en charbon de bois, par simple collecte du bois mort. Dans d'autres régions, par exemple en milieu sahélien, la métallurgie a probablement nuí davantage à la végétation.

L'assèchement du lac Sinnda, entre - 1900 et 700, correspond à un vide archéologique : on a pas retrouvé de

traces d'occupation humaine entre - 1500 et 800. Les hommes semblent avoir temporairement fui cette région devenue inhospitalière.

En Amazonie, l'influence humaine ancienne se traduit par la présence d'espèces particulières de plantes. Au Brésil, les bambous envahissent souvent les anciennes plantations d'hévéas et y bloquent la régénération forestière : leurs feuilles, en tombant et en se décomposant, rendraient le sol toxique pour les autres plantes. Dans les zones où poussent les cambouses, une sorte de bambou, on ne rencontre presque aucune autre espèce. En Guyane, ces cambouses bloquent toujours la régénération de la forêt, bien que les Indiens, qui les ont apportées avec eux, aient déserté la région depuis trois siècles.

Aujourd'hui, en Afrique centrale, malgré la sécheresse relative des zones de savane, le climat est de nouveau favorable à la forêt : la persistance des savanes semble anormale. Elle résulte de la pratique des feux allumés par les chasseurs pour se déplacer plus facilement ou rabattre le gibier (voir la figure 4). Les chaumes brûlés, dans les sédiments des plateaux Batéké, montrent que cette technique de chasse est au moins pratiquée depuis - 100. Les feux ont favorisé la prolifération des plantes herbacées, au détriment des arbres, dont ils ont détruit les plantules.

La présence actuelle des savanes en Afrique centrale résulte de plusieurs facteurs. L'assèchement de l'Holocène supérieur, facteur paléoclimatique, fut le moteur premier de l'apparition des savanes, entre - 1500 et 500. Les

conditions locales d'humidité furent également déterminantes : les sols sableux sont secs et favorables à la savane, tandis que les sols argileux sont humides et favorables à la forêt. Les feux de brousse naturels ont bloqué la progression forestière, quand le climat était plus sec qu'aujourd'hui, puis les feux allumés par la population l'ont ralenti, lorsque le climat est redevenu humide. En l'absence de brûlis, toutes les zones de savane auraient déjà été reconquises par la forêt, comme le montre la rapidité de la progression forestière dans les zones où l'on n'allume plus de feu.

Bien que la progression de la forêt équatoriale soit freinée par les feux, ceux-ci ne la détruisent pas. Au pire, le feuillage des arbres de la lisière se dessèche sur quelques mètres, ce qui n'a pas de conséquence durable. En revanche, les feux détruisent les plantules pionnières qui ont germé en savane. Dans les conditions actuelles, la forêt ne reconquerra son ancien territoire que dans 500 à 1 000 ans.

L'effet global des activités humaines sur la végétation dépend de la densité de population, de la proximité des centres urbains et du type d'exploitation de la forêt. Les brûlis entravent la progression de la forêt, les défrichements agricoles (voir la figure 4) et une exploitation forestière mal gérée la dégradent et les cultures intensives pérennes la détruisent.

Cependant, l'homme contribue aussi à la reconquête de la forêt sur la savane, car les arbres le long des villages et des pâturages forment parfois des bosquets dont l'agrégation peut donner naissance à une nouvelle forêt (voir la figure 4). La *Chromolaena odorata*, une sorte de buisson originaire d'Amazonie, introduite involontairement par l'homme en Afrique centrale il y a 30 ans, arrête les feux en s'interposant entre la lisière et la forêt. Elle favorise la progression de cette dernière, car les plantes ombrophiles poussent sous ses buissons.

Au Cameroun, au Gabon et au Congo, le bilan des surfaces gagnées par la forêt lors de la progression naturelle et de celles perdues par défrichement semble globalement favorable à la forêt. Cependant, ce constat ne préjuge pas du degré de dégradation des forêts denses par des exploitations mal conduites.

Les rapports entre l'homme et son environnement en milieu équatorial

Des indicateurs pour reconstituer l'histoire de la végétation

Les pollens

Le pollen, vecteur mâle de fécondation des plantes à fleurs, est constitué de grains microscopiques à paroi très résistante. Il se conserve parfaitement dans les lacs et dans les tourbières. Il est caractéristique de l'espèce ou de la famille de la plante dont il est issu. Les carottages permettent d'identifier les associations de plantes dans les différentes couches sédimentaires et de reconstituer ainsi l'histoire de la végétation.



Exemple de pollen des milieux équatoriaux.

Les diatomées

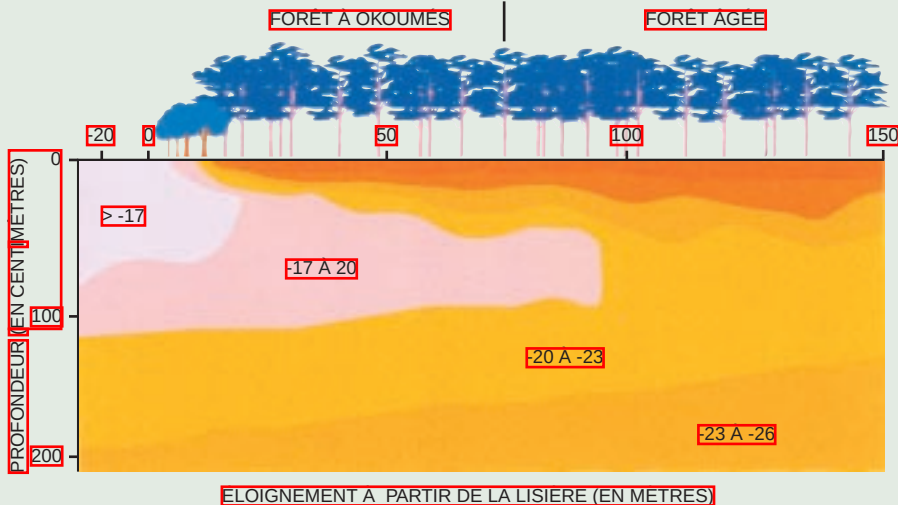
Les diatomées sont des algues microscopiques. Elles vivent dans une enveloppe à base de silice, caractéristique de chaque espèce, qui se conserve très bien dans les sédiments. Les proportions des différentes espèces de diatomées varient avec les modifications des milieux aquatiques dans lesquels elles vivent. Elles sont ainsi utilisées comme indicateurs de la température et de la profondeur des eaux.



Diatomée du lac Ossa, au Cameroun.

Le carbone 13

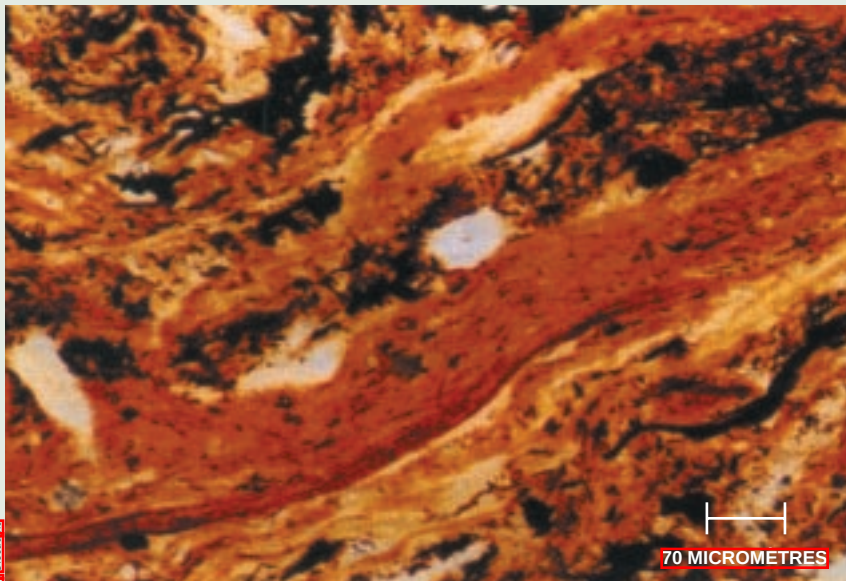
Le carbone 12 et le carbone 13 sont des isotopes dont le noyau atomique contient six protons et respectivement six et sept neutrons. Le carbone 13 constitue 1,1 pour cent du carbone total. Les graminées de savane et les plantes forestières n'ont pas le même mécanisme de photosynthèse : à partir du dioxyde de carbone de l'atmosphère, elles assimilent plus ou moins le carbone 13, en fonction des paramètres physiques et chimiques mis en jeu. Elles présentent des rapports isotopiques différents : de l'ordre de -27 pour mille sous forêt et de -15 pour mille sous savane (les valeurs intermédiaires indiquent que la forêt a succédé à la savane ou la savane à la forêt). On dispose ainsi d'un marqueur naturel permettant, par l'analyse des matières organiques des sols, de connaître les alternances entre forêt et savane depuis plusieurs millénaires.



Ces courbes d'isovaleurs des rapports entre carbone 12 et 13 (indiqués sur la figure, à la frontière entre forêt et savane, sur le littoral du Congo, montrent que la savane (en rose) a remplacé la forêt (en orange) de -1900 à -500, puis que la forêt a de nouveau gagné du terrain.

Les charbons de bois

Les fragments de charbon, importants ou microscopiques, dans les sédiments témoignent des incendies passés. Dans les écosystèmes équatoriaux, ils correspondent aux périodes de sécheresse sans lesquelles les feux ne se seraient pas déclenchés. Souvent, on peut identifier les espèces de plantes qui ont brûlé et reconstituer ainsi partiellement la flore.



Microcharbons dans des lits sédimentaires au Brésil.

sont complexes et le schéma largement répandu de l'homme prédateur de la forêt est trop simpliste. En se juxtaposant aux variations climatiques, son action a contribué à façonner les paysages que nous connaissons. Aujourd'hui, ces paysages continuent à évoluer, sous l'effet des facteurs naturels actuels et passés, auxquels la végétation réagit à retardement, et des facteurs humains, de plus en plus importants. Sous nos yeux, des savanes se referment. En même temps, des forêts disparaissent, transformées en pâturages ou en cultures plus ou moins pérennes. La gestion rationnelle de ces milieux, et la volonté, autant politique que scientifique, de créer des aires protégées ne seront effectives que si l'on comprend les interactions écologiques et anthropiques. Seule une approche spatio-temporelle des mécanismes, couplée à la confrontation du terrain et de la modélisation, fournira des éléments de compréhension, puis de décision.

Dominique SCHWARTZ est pédologue à l'IRD et professeur de géographie physique à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg.

T. VAN DER HAMMEN, *The Palaeoecology and Palaeogeography of Savannas, in Tropical Savannas*, sous la direction de F. Bourlière, 1983.

R. LANFRANCHI et D. SCHWARTZ, *Paysages quaternaires de l'Afrique centrale atlantique*, ORSTOM, collection Didactiques, Paris, 1990.

C.M. HLADIK, H. PAGEZY, O.F. LINARES, G.J.A. KOPPERT et A. FROMENT, *L'alimentation en forêt tropicale. Interactions bioculturelles et perspectives de développement. I. Les ressources alimentaires : production et consommation*, UNESCO, Paris, 1996.

P. COLINVAUX, *Quaternary Environmental History and Forest Diversity in the Neotropics*, in *Evolution and Environment in Tropical America*, sous la direction de J.B.C. Jackson, A.F. Budd et A.G. Coates, 1996.

H. HOOGHIEMSTRA et T. VAN DER HAMMEN, *Neogene and Quaternary Development of the Neotropical Rain Forest : The Forest Refugia Hypothesis and a Literature Overview*, in *Earth-Sci. Rev.*, pp. 147-183, 1998.

Actes du Symposium International « Dynamique à long terme des écosystèmes forestiers intertropicaux », UNESCO, Paris, à paraître.

L'intelligence en essaim

ERIC BONABEAU • GUY THERAULAZ

S'inspirant des fourmis et des insectes sociaux, des informaticiens ont créé des «agents» qui coopèrent pour résoudre des problèmes complexes. Ils automatisent notamment la gestion des données dans les réseaux de télécommunications.

Dans son livre *La vie des termites*, le poète belge Maurice Maeterlinck (1862-1949) écrit à propos de ces insectes : «Qui est-ce qui donne des ordres, prévoit l'avenir, trace des plans, équilibre, administre, condamne à mort? Tout cela n'est-il que jeux de chaos?» Ces questions préoccupent également les biologistes : dans une colonie d'insectes sociaux, tels les fourmis, les abeilles, les termites, etc., pourquoi le groupe est-il cohérent alors que chaque individu semble autonome? Comment les activités de tous les individus sont-elles coordonnées sans supervision? Les éthologistes qui étudient le comportement des insectes sociaux observent que la coopération au sein des colo-

nies est auto-organisée : souvent, elle résulte d'interactions entre les individus. Bien que ces interactions puissent être simples (par exemple, une fourmi se contente de suivre la trace laissée par une autre), elles permettent à la collectivité de résoudre des problèmes difficiles, telle la recherche du chemin le plus court entre le nid et une source de nourriture, parmi d'innombrables voies possibles. Chez les insectes sociaux, le comportement collectif qui émerge des comportements simples des individus est nommé intelligence en essaim.

Ces phénomènes d'intelligence en essaim sont de plus en plus étudiés en informatique et en robotique, où des systèmes de contrôle centralisés

gagnent à être remplacés par d'autres, plus autonomes et plus flexibles, fondés sur les interactions d'éléments simples. Dans cet article, nous détaillons plusieurs applications qui montrent les avantages et la pertinence de ce type de système : une nouvelle méthode de modification du trafic d'un réseau de télécommunications saturé, calquée sur le comportement des fourmis à la recherche de nourriture ; des algorithmes de commande pour des robots plus efficaces, inspirés de la coopération des fourmis qui transportent une grosse proie ; une nouvelle analyse des données bancaires copiée sur la manière dont les insectes agrègent les cadavres d'ouvrières de la colonie et trient leurs larves.





ANTHONY M. BROWN

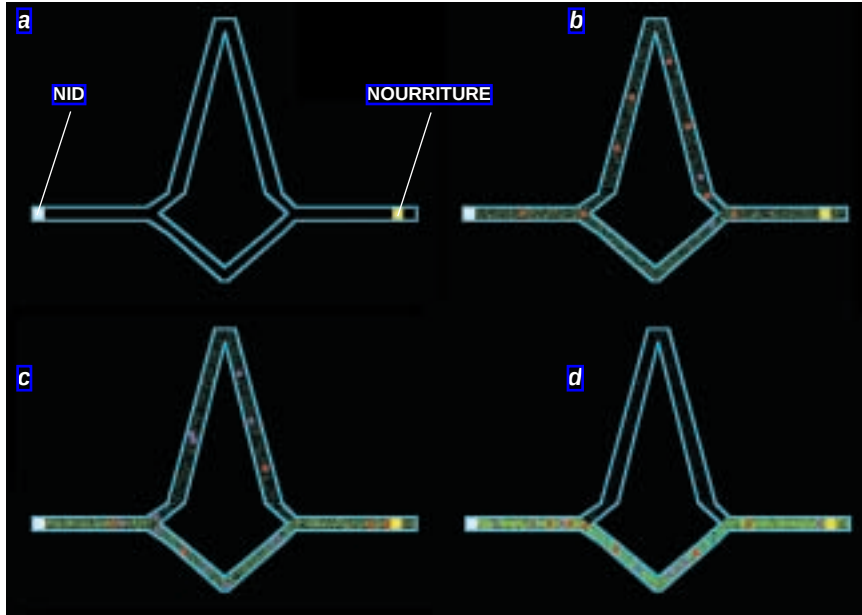
1. LES FOURMIS *ECOPHYLLES* CONSTRUISSENT UN NID grâce à une coopération de tous les individus de la colonie. Pour joindre deux

importantes (page de gauche). Puis ces chaînes rétrécissent et, enfin, des fourmis maintiennent les deux feuilles (en haut) pendant que d'autres utilisent la soie sécrétée par les larves pour les fixer (en bas).

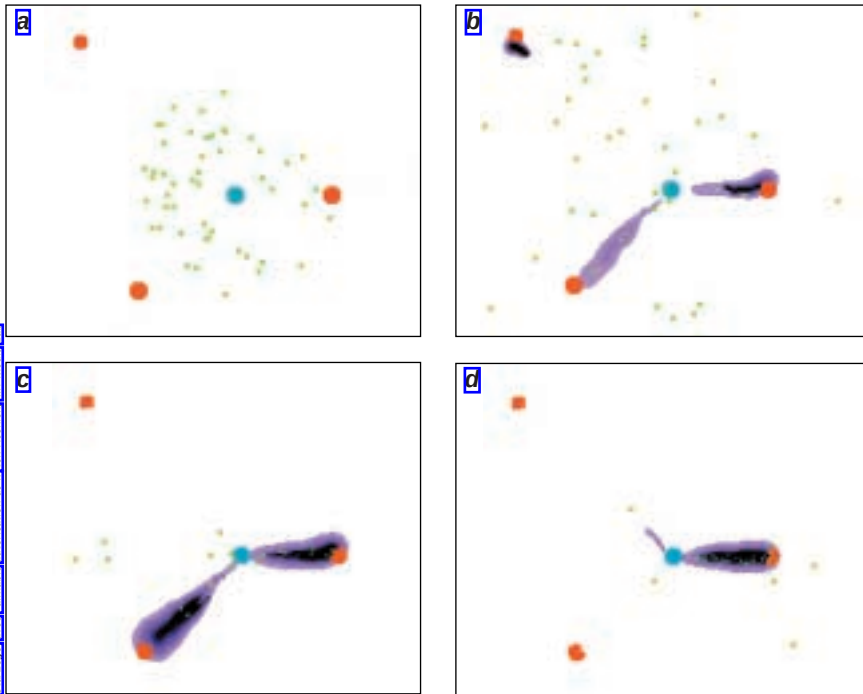
Des fourmis virtuelles

À Bruxelles, Jean-Louis Deneubourg et ses collègues ont été des pionniers de l'intelligence en essaim. Ils ont montré que les processions de fourmis résultent de la sécrétion par les individus d'une phéromone, une molécule

qui attire d'autres fourmis (voir *La détection des phéromones*, par Kjell Døving et Didier Trotier, *Pour la Science*, septembre 1999). La création d'une telle piste marquée est une bonne stratégie pour trouver le chemin le plus court entre un nid et une source de nourriture.



2. LES PISTES DE PHEROMONE que suivent les fourmis permettent à celles-ci de chercher efficacement leur nourriture. Des fourmis quittent le nid (en rouge), et suivent au hasard l'une des deux voies où elles déposent de la phéromone (en vert). Les fourmis qui ont emprunté le chemin le plus court retournent au nid le plus vite (en violet) : cette piste est alors davantage marquée à la phéromone ; elle attirera davantage de fourmis que le chemin plus long.



3. DANS CETTE SIMULATION INFORMATIQUE, trois sources de nourriture identiques sont situées à des distances inégales d'un nid (en bleu). Après avoir cherché au hasard (a), les fourmis atteignent les sources à proximité du nid (b et c), puis sélectionnent la plus proche (d). À mesure que la nourriture s'épuise, la concentration en phéromone diminue, et les fourmis exploiteront une source plus éloignée.

Dans une expérience, des fourmis d'Argentine *Linepithema humile* étaient séparées d'une source de nourriture par deux voies, l'une d'une longueur double de l'autre ; en quelques minutes, elles choisissaient le chemin le plus court. Comment ? Les fourmis suivent des pistes marquées par une phéromone et elles en déposent derrière elles. Les premières fourmis qui retournent au nid à partir de la source de nourriture ont emprunté le chemin le plus court dans les deux sens : ce chemin, marqué deux fois par la phéromone, attire plus les autres fourmis que le long chemin, marqué une seule fois (voir la figure 2).

Toutefois, quand le chemin le plus court n'est ouvert qu'après le chemin plus long, déjà marqué à la phéromone, les fourmis continuent de parcourir le chemin plus long. Dans les systèmes artificiels, les informaticiens évitent cet écueil en employant des phéromones volatiles : ainsi, les pistes de phéromone subsistent difficilement sur les chemins les plus longs. Les fourmis virtuelles empruntent alors les voies plus courtes, même quand elles ont été découvertes plus tardivement. Grâce à cette propriété, le système ne se stabilise pas sur des solutions médiocres. Notons que, chez *Linepithema humile*, les concentrations en phéromone décroissent effectivement, mais très lentement.

Dans une simulation informatique où les phéromones s'évaporaient, les informaticiens ont présenté à une colonie artificielle des sources de nourriture identiques, à des distances différentes du nid : les fourmis virtuelles ont exploré leur environnement au hasard, puis elles ont établi des pistes qui reliaient toutes les sources de nourriture au nid. Elles n'ont d'abord exploité que les sources les plus proches, en entretenant les pistes qui y menaient. Enfin, quand cette nourriture est épuisée, les fourmis virtuelles se sont dirigées vers les sources plus éloignées. Quelle application peut avoir une telle simulation ?

Marco Dorigo et ses collègues de l'Université libre de Bruxelles ont transposé cette stratégie pour résoudre le « problème du voyageur de commerce ». Il s'agit de trouver le plus court chemin passant une seule fois par des villes reliées par des chemins fixes. La formulation est simple, mais le problème est difficile : pour seulement 15 villes, il y existe environ 90 milliards de trajets possibles.

Ce problème est « NP-complet » : le nombre d'étapes de calcul augmente

plus vite que n'importe quelle puissance du nombre de villes. Pourtant, M. Dorigo a trouvé une solution quasi optimale à l'aide de fourmis artificielles qui déposent l'équivalent numérique de pistes de phéromone volatiles.

Des fourmis représentantes

Le programme commence à lâcher au hasard sur le réseau de villes des fourmis virtuelles indépendantes, qui vont au hasard de ville à ville, en privilégiant les trajets les plus courts (les fourmis connaissent les distances des villes grâce à des tables qui les répertorient). Après avoir visité toutes les villes, chaque fourmi rebrousse chemin, déposant à nouveau une certaine quantité de phéromone virtuelle sur les liaisons qu'elle parcourt. La quantité de phéromone déposée est inversement proportionnelle à la longueur totale du chemin parcouru par la fourmi. Comme la phéromone s'évapore, les liaisons des parcours longs sont moins chargées en phéromone que celles des trajets les plus courts. Lorsque toutes les fourmis ont terminé, les quantités de phéromone déposées par chaque fourmi sont superposées. Parmi toutes les liaisons, celles qui sont les plus riches en phéromone appartiennent à un plus grand nombre de trajets courts.

Puis les fourmis artificielles sont de nouveau libérées au hasard : elles sont maintenant guidées par les pistes de phéromone déposées précédemment (les liaisons à forte concentration sont favorisées), ainsi que par les distances entre les villes (les localités les plus proches ont priorité). La concentration en phéromone et la distance entre deux villes ont une influence égale dans le choix d'une piste.

Quand toutes les fourmis sont de retour dans leur ville de départ, on réitère l'opération. À mesure des essais, le trajet des fourmis artificielles se réduit et, au final, les liaisons favorisées, mises bout à bout, constituent un trajet total court (voir la figure 4).

Quelquefois, de nombreux trajets contiennent une liaison courte qui ne fait pas partie d'un trajet court : cette liaison est donc très marquée sans faire partie d'un trajet optimal. M. Dorigo a découvert que cette liaison n'est utilisée que lors de quelques itérations. Rapidement, une autre liaison, qui fait partie d'un trajet court, est choisie : elle est davantage renforcée que la liaison

précédente, qui perd alors son attrait à mesure que la phéromone s'évapore. Cette optimisation résulte de l'interaction du renforcement et de l'évaporation de la phéromone.

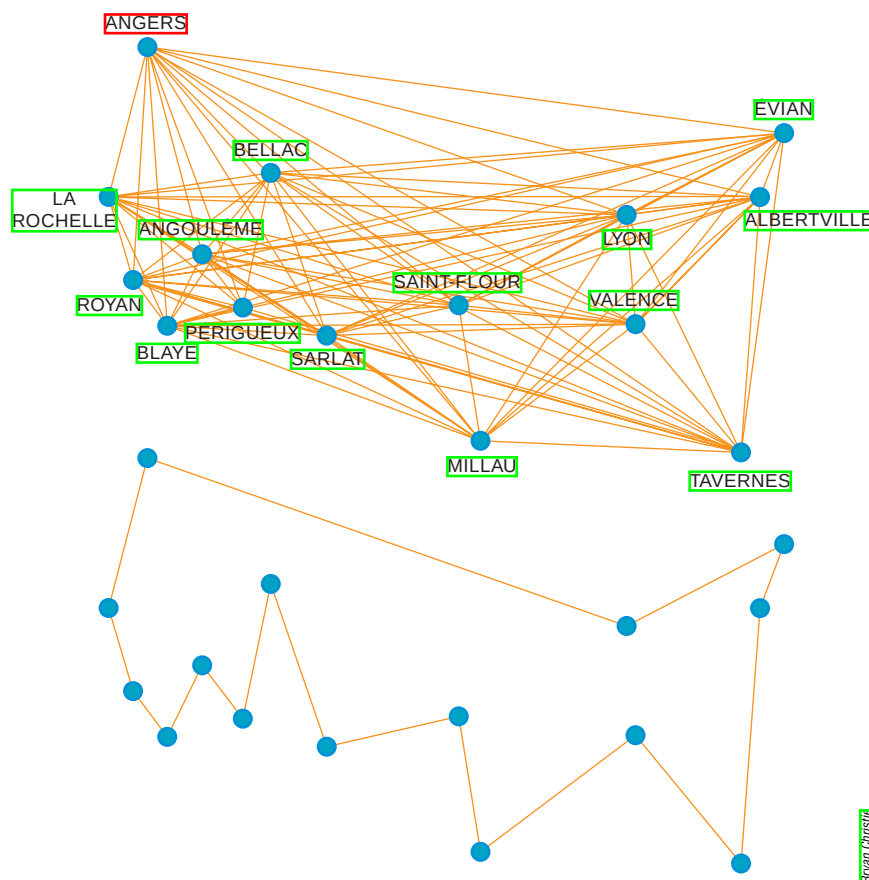
À l'inverse, une liaison longue est parfois indispensable à un trajet court. Cette liaison est initialement moins empruntée, mais, comme dans le cas précédent, elle sera rapidement renforcée après qu'elle aura été choisie.

Si cette méthode inspirée par le comportement des fourmis est efficace pour trouver des chemins courts, elle n'identifie pas nécessairement le plus court. On se contente toutefois de telles solutions quasi optimales, car la recherche du meilleur chemin nécessite une quantité excessive de calculs. En outre, ce système est flexible : les fourmis artificielles explorent continuellement différentes voies ; les différentes pistes de phéromone fournissent donc des plans de secours. Ainsi, lorsqu'une voie est coupée, des solutions de rechange sont déjà prêtes. Cette propriété, qui explique sans doute le succès écologique des vraies fourmis, est cruciale pour de nombreuses applications.

Des approches similaires ont résolu d'autres tâches d'optimisation. Par exemple, des fourmis artificielles ont résolu le problème d'«affectation quadratique», où l'on veut répartir la fabrication de divers produits dans différentes usines en minimisant la distance totale que chaque élément doit parcourir entre les diverses installations. David Gregg, de la Société *Unilever*, et Vince Darley et Alberto Donati, de la Société *Bios Group*, ont mis au point un modèle fondé sur le comportement des fourmis pour réduire le temps de production dans une usine de la Société *Unilever* : le système organise l'emploi des réservoirs de stockage, des mélangeurs chimiques, des chaînes d'emballage et d'autres équipements.

Outre les problèmes d'optimisation, qui sont statiques, les agents de type fourmi résolvent également les problèmes de systèmes dynamiques, tel le flux d'un réseau de télécommunications ou de la production dans une usine où une machine tombe en panne.

Un réseau de téléphone, par exemple, est dynamique et imprévisible : un appel de A vers B passe par des



4. PARMI TOUS LES CHEMINS qui relient 15 villes (en haut), les fourmis virtuelles déterminent un des chemins les plus courts (en bas) en déposant des pistes de phéromones que leurs congénères suivent.

La flexibilité du travail

Dans une colonie d'abeilles, les individus ont une spécialité qui dépend de leur âge. Par exemple, les abeilles les plus vieilles sont plutôt des butineuses, tandis que les jeunes sont les nourrices. L'attribution des tâches n'est pas rigide : lorsque la nourriture manque, les nourrices butinent également.

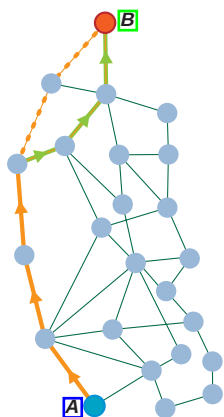
Cette répartition souple du travail nous a inspiré, avec Michael Campos, de l'Université Northwestern, une technique de programmation des cabines de peinture dans une entreprise de construction automobile. Dans l'usine, les cabines peignent les véhicules assemblés, et chaque cabine, à la manière d'une abeille artificielle, est spécialisée dans une couleur. Le changement de couleur d'une cabine est long et coûteux.

Nous avons supposé qu'un individu abandonne une tâche s'il perçoit un besoin important pour une autre fonction. Ainsi, une cabine à peinture rouge utilisera cette couleur jusqu'à ce qu'il soit urgent de peindre un véhicule en blanc, alors que les cabines spécialisées pour le blanc sont saturées.

Malgré la simplicité des règles, le système des abeilles permet aux cabines de peinture d'être programmées plus efficacement, notamment avec moins de changements de couleur, qu'avec un ordinateur centralisé. D'autre part, la méthode s'adapte aux souhaits des consommateurs : quand la demande de véhicules blancs augmente de façon inattendue, des cabines renoncent rapidement à leur couleur de spécialisation et reçoivent les véhicules non affectés. En outre, le système traite facilement les contretemps, telles les pannes de cabines, que d'autres stations compensent rapidement en partageant le travail supplémentaire.



LES ABEILLES adaptent leur travail aux besoins de la ruche. La façon dont ces tâches sont réparties inspire aux informaticiens des améliorations dans la façon de programmer les équipements d'une usine automatisée (à droite), telle une usine automobile.



Source: Christie

5. LE TRAFIC D'UN RESEAU peut être modifié rapidement à l'aide d'agents logiciels qui se comportent comme des fourmis. Un appel de A à B transite à travers des nœuds intermédiaires. Quand une partie de la voie la plus courte (en orange) est congestionnée, le système redirige la transmission vers une autre voie (en vert). Des agents logiciels effectuent ce changement automatiquement, de la même manière que les fourmis visitent différentes sources de nourriture : une voie congestionnée équivaut à une source de nourriture épuisée.

nœuds intermédiaires, ou stations de commutation. Comment planifier le trajet du message ? Un algorithme qui gère ainsi les messages ou les appels doit éviter les zones congestionnées afin de minimiser les délais, et il doit trouver des voies de secours lorsque les conditions se détériorent. Le mauvais temps ou une saturation locale pendant un jeu télévisé obligent à rediriger les appels vers des parties moins encombrées (voir la figure 5).

Des fourmis au téléphone

Ruud Schoonderwoerd et Janet Bruten, des Laboratoires de recherche Hewlett-Packard, et Owen Holland, de l'Université de Bristol, ont mis au point un système où des agents de type fourmi déposent des bits d'information, une «phéromone virtuelle», à l'endroit des nœuds du réseau pour renforcer les passages à travers des zones non congestionnées, tandis qu'un

mécanisme d'évaporation ajuste l'information donnée par les nœuds pour défavoriser les zones encombrées.

Chaque nœud dispose d'une «table de trafic», qui indique aux appels téléphoniques le chemin à suivre selon leur destination. Des agents de type fourmi ajustent en permanence les valeurs des tables qui reflètent alors les conditions de circulation sur le réseau. Un agent qui subit un retard important dans une partie de réseau congestionnée ajoute une petite quantité de phéromone virtuelle aux valeurs des tables susceptibles d'envoyer les appels vers cette zone surchargée. En termes mathématiques, les valeurs des nœuds correspondants sont légèrement augmentées.

En revanche, un agent qui passe rapidement d'un nœud à un autre renforce l'utilisation de cette voie en déposant une grande quantité de phéromone, c'est-à-dire que les valeurs des tables augmentent notablement. Les calculs empêchent qu'un chemin encombré, donc suivi par de nombreux agents, ait une quantité de phéromones supérieure à celle déposée sur une voie non congestionnée fréquentée par moins d'agents.

Le système supprime les solutions obsolètes grâce à une «évaporation mathématique» : toutes les valeurs des tables sont régulièrement diminuées. Cette évaporation et l'augmentation des valeurs par les agents de type fourmi fonctionnent de pair : ainsi, sur les voies encombrées, l'évaporation est supérieure au renforcement ; en revanche, les chemins dégagés se renforcent.

L'équilibre entre évaporation et renforcement est fragile. Lorsqu'un chemin qui était satisfaisant se congestionne, les agents qui l'empruntent sont retardés, et l'évaporation devient supérieure au renforcement. Le chemin est alors rapidement abandonné, et les agents découvrent (ou redécouvrent) d'autres solutions qu'ils exploitent. Les avantages sont doubles : lorsque des appels téléphoniques sont redirigés vers des zones du réseau moins surchargées, d'une part celles-ci se décongestionnent, et, d'autre part, les appels sont rapides.

Les Sociétés France Télécom et British Telecommunications ont été les premières à étudier ces méthodes. Aux États-Unis, la Société MCI Worldcom utilise également ces méthodes pour d'autres tâches, telle la facturation des clients. Le réseau Internet, où le trafic est particulièrement imprévisible, est celui qui profitera le plus des programmes d'intelligence en essaim.

Des fourmis sur la toile

Pour gérer les conditions astreignantes du réseau *Internet*, M. Dorigo et son collègue Gianni Di Caro ont perfectionné les agents de type fourmi afin qu'ils tiennent compte de facteurs supplémentaires, tel le temps total de transit d'une information entre son départ et son arrivée (pour les réseaux téléphoniques, seul le temps d'un nœud à un autre est pris en compte, et le trafic est supposé égal quel que soit le sens). Aussi bien pour la maximisation des débits que pour la minimisation des délais, les premiers résultats des simulations indiquent que ce système de gestion du trafic est plus efficace que ceux qui sont utilisés, tel le protocole aujourd'hui en vigueur sur le réseau *Internet*, où les nœuds s'informent en permanence de l'état des liaisons auxquelles ils sont connectés.

Outre l'orientation et le déplacement, d'autres comportements d'insectes sociaux sont copiés par les roboticiens. Par exemple, ils étudient le transport coopératif chez les fourmis pour concevoir des techniques de commande d'un groupe de robots.

Chez certaines espèces, une fourmi qui ne peut récupérer seule une proie recrute parfois des congénères pour l'aider : pendant quelques minutes, les fourmis changent de positions et d'alignements autour de l'objet, jusqu'à ce qu'elles soient capables de transporter la proie vers le nid.

Ronald Kube et Hong Zhang, de l'Université d'Alberta, ont reproduit ce comportement avec des robots mécaniques. Ces derniers devaient pousser une boîte vers un emplacement donné. La boîte ne pouvait être poussée par un seul robot et, de surcroît, ceux-ci étaient dotés d'instructions simples telles que : trouver la boîte, établir un contact avec elle, se positionner de manière à ce que la boîte se trouve entre le robot et le but, puis pousser la boîte en direction du but.

Malgré la simplicité des programmes, la similitude entre le comportement des robots et celui d'une colonie de fourmis est frappant : les robots se déplacent d'abord au hasard, à la recherche de la boîte. Puis, quand ils l'ont localisée, s'ils sont en nombre suffisant, ils la poussent. Lorsque la boîte reste immobile, les robots changent leurs positions et leurs alignements. Ils se repositionnent en permanence lorsqu'ils perdent le contact avec la boîte, quand

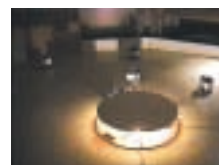
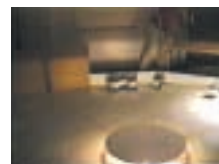
ils se bloquent mutuellement ou lorsque la boîte tourne. Enfin, malgré leurs capacités limitées, les robots amènent la boîte au but (voir la figure 6).

Confrontés au même problème, des êtres humains imaginent des collaborations plus efficaces. Toutefois, l'approche de l'intelligence en essaim est propice à la miniaturisation et à la réduction des coûts. Les ingénieurs concevraient ainsi des robots simples et peu onéreux qui coopéreraient pour des tâches de plus en plus complexes.

Dans un autre projet, des méthodes d'analyse de données financières reproduisent les stratégies de regroupement des cadavres et de tri des larves mis en œuvre par les fourmis. Chez les fourmis *Messor sancta*, les ouvrières nettoient les nids en entassant à l'extérieur

les cadavres. Dans des nids artificiels reproduits en laboratoire, elles regroupent en quelques heures des corps dispersés de façon aléatoire (voir la figure 7). De la même manière, les ouvrières de l'espèce *Leptothorax unifasciatus* trient systématiquement les larves et les œufs. Les petites larves sont regroupées avec les œufs, les pupes et pré-pupes (des stades intermédiaires dans le développement des insectes) sont autour, elles-mêmes entourées par les larves les plus grandes.

Selon J.-L. Deneubourg, de petits amas de cadavres s'agrandissent, car ils attirent les ouvrières qui y déposent plus d'éléments : cette rétroaction positive entraîne la formation de tas de plus en plus grands. Pour les couvées, les fourmis ramassent et déposent les éléments en fonction du nombre d'objets similaires environnants. Par exemple, quand une fourmi trouve une grande larve entourée d'œufs, elle prend de préférence la larve qui constitue «l'intrus» et la dépose dans une zone qui contient déjà d'autres grandes larves.



6. LA COOPÉRATION DES FOURMIS, ici pour porter une grosse proie (à gauche), a inspiré aux informaticiens des programmes simplifiés de robots. Dans une expérience réalisée à l'Université d'Alberta, les robots doivent pousser une boîte circulaire illuminée vers une source de lumière. Bien que chaque robot (en haut, à gauche) ne communique pas avec les autres et agisse indépendamment, en suivant un petit ensemble d'instructions simples, l'action collective du groupe permet d'atteindre l'objectif fixé (à droite).

Des cimetières de données

En se fondant sur ce tri du couvain, nos collègues britanniques Erik Lumer et Baldo Faieta ont mis au point une méthode d'exploration d'une grande banque de données. Supposons, par exemple, qu'une banque veuille identifier ses clients les plus susceptibles de rembourser un prêt. La banque dispose de nombreux renseignements sur ses clients, tels l'âge, le sexe, la situation familiale, le type de logement, les services bancaires favorisés... En étudiant des groupes de personnes aux caractéristiques similaires, les responsables des prêts détermineraient la fiabilité des divers clients et ils pourraient exiger des garanties solides des demandeurs de prêt appartenant aux groupes dominés par des débiteurs défaillants.

Les spécialistes d'analyse des données aiment visualiser les groupes sur un plan (au-delà, l'interprétation des données est difficile), où chaque client est représenté par un point. Ces clients sont donc dans la situation des œufs et des larves que des fourmis logicielles peuvent déplacer, ramasser et déposer selon les éléments environnants. La distance entre deux clients indique leur degré de similitude. Les fourmis arti-

ficielles prennent leur décision de tri en fonction de toutes les caractéristiques des clients et, selon les objectifs de la banque, le logiciel peut avantager mathématiquement certains attributs.

Grâce à ce type d'analyses, une banque identifie facilement les personnes âgées d'environ 20 ans, célibataires, vivant pour la plupart chez leurs parents et dont le service bancaire préféré est le suivi des placements, ou celles qui sont âgées d'environ 57 ans, de sexe féminin, mariées ou veuves et propriétaires de leur logement sans hypothèque.

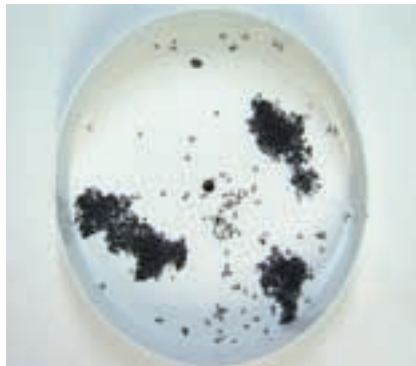
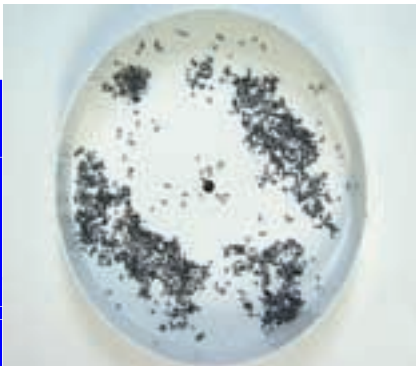
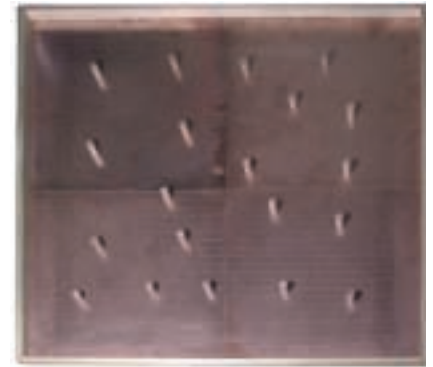
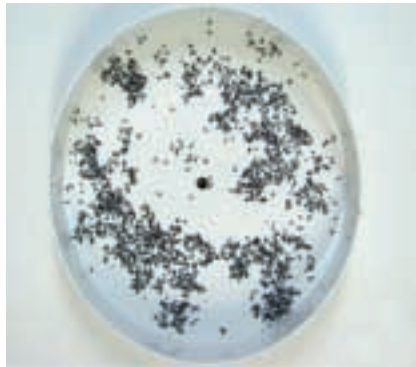
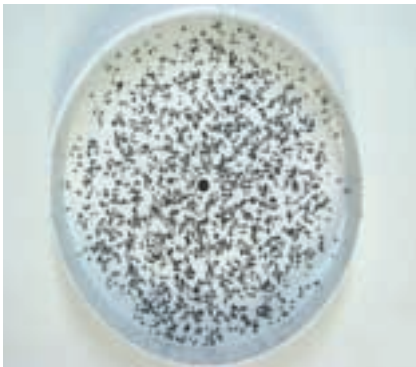
Les banques et les compagnies d'assurances utilisent déjà ce type d'analyse de profils. Cependant, grâce au modèle des fourmis, la visualisation des données est facile et, surtout, le nombre de groupes ressort automatiquement des données, alors que les méthodes classiques requièrent un nombre prédéfini de groupes où les données sont réparties. Ainsi, le tri des fourmis artificielles met au jour des communautés qui autrement restent cachées.

Par ailleurs, l'agrégation des cadavres a inspiré Alcherio Martinoli et ses collègues de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, qui ont transposé les comportements des four-

mis à des robots nommés Khepera. Chaque robot est équipé d'une pince avec laquelle il saisit et transporte des objets d'un diamètre inférieur à cinq centimètres. Grâce à des récepteurs infrarouges, les robots évitent les obstacles ou les autres robots. Quand l'obstacle est petit, le robot y voit un objet à prendre : lorsque le robot ne transporte rien, il saisit l'objet ; sinon, il dépose l'objet qu'il tient à côté du nouvel objet. Les expériences ont été effectuées dans une arène carrée de 80 centimètres de côté, où cinq robots et 20 objets ont été répartis au départ. En quelques heures, les robots ont rassemblé tous les objets et construit des agrégats en forme de serpents (voir la figure 7).

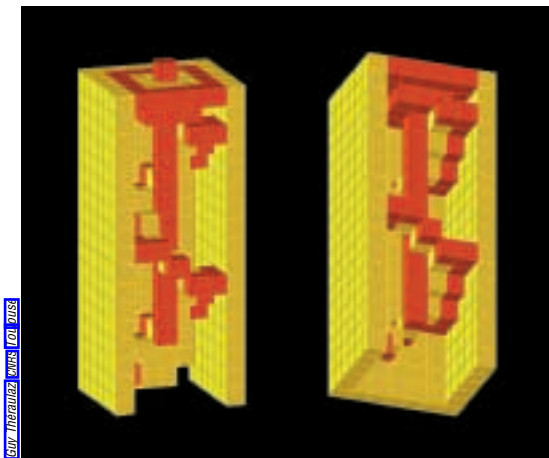
L'agrégation d'objets n'est qu'une première étape vers la compréhension du lien existant entre le processus de construction d'une structure spatiale et des algorithmes de résolution distribués. Quel doit être le comportement des robots ? Quelles règles de dépôt et de prise d'objets doivent-ils suivre afin que leurs interactions produisent la forme recherchée ?

Les insectes sociaux ont déjà répondu à ces questions. Ainsi, chez les guêpes sociales, qui construisent des nids, en carton ou en boue, d'architecture



7. LES FOURMIS OUVRIÈRES regroupent les cadavres pour nettoyer leur nid. Dans une expérience, 1 500 cadavres sont éparpillés au hasard (en haut, à gauche) : après 26 heures, les ouvrières ont formé trois amas (en bas, au centre). Ce comportement et la

manière dont les fourmis trient également leurs larves ont inspirés des algorithmes de robots, qui déplacent des objets placés initialement au hasard dans une arène (en haut, à droite), et les rassemblent en un serpent (en bas, à droite).



8. CETTE STRUCTURE (vue sous deux angles) a été obtenue par auto-assemblage de 500 briques grâce à un processus « stigmergique » : selon le voisinage perçu, c'est-à-dire l'état des 26 briques qui l'entourent, l'agent virtuel bâtisseur dépose ou non une brique dans la cellule qu'il occupe. On a ôté la couche de briques superflue pour montrer la structure interne de l'ensemble.

complexe, la forme du nid détermine indirectement la construction par un processus nommé stigmergie : certaines microstructures rencontrées sur le nid influencent l'activité bâtitrice. Par exemple, certaines configurations de cellules, identifiées par la guêpe grâce à ses antennes, entraînent la construction d'une nouvelle cellule, alors que d'autres sont sans effet. La dynamique de construction s'apparente à un processus d'auto-assemblage. Nous avons montré que les structures produites par cet auto-assemblage et des algorithmes stigmergiques pouvaient être très élaborées (voir la figure 8). De plus, d'autres problèmes peuvent être convertis sous la forme d'une représentation spatiale, afin d'être résolus par des robots manipulateurs d'objets. Les divers systèmes que nous avons détaillés illustrent l'abondance d'applications fondées sur le comportement des insectes sociaux. Nous pouvons encore citer d'autres exemples : la planification du travail dans une usine peut être améliorée par l'étude de la flexibilité de la répartition des tâches chez les abeilles (voir l'encadré de la page 70) ; inspiré par la manière dont les guêpes construisent leurs nids, Dan Petrovich, de l'Institut de technologie de l'armée de l'air américaine, a mis au point un essaim de petits satellites mobiles qui s'assembleraient en une structure donnée plus grande ; grâce à des agents logiciels de type insecte, Van Dyke Parunak, de l'Institut de recherches environnementales du Michigan, résout des problèmes de fabrication, telle la gestion d'un

réseau de fournisseurs d'une usine...

Paul Kantor, de l'Université Rutgers, utilise l'intelligence en essaim pour rechercher des informations sur le réseau Internet, ainsi que dans d'autres grands réseaux : dans une colonie d'utilisateurs, les internautes à la recherche de sites intéressants accèdent aux informations sous forme de phéromones numériques laissées par d'autres membres de la même colonie lors de recherches précédentes.

L'intelligence en essaim offre un moyen de concevoir des systèmes capables de s'adapter rapidement à des conditions changeantes. Elle s'est développée grâce à notre compréhension du fonctionnement des sociétés d'insectes, même si parfois les détails précis sur les mécanismes impliqués sont encore inconnus.

Toutefois, bien qu'efficaces dans de nombreuses tâches d'optimisation et de contrôle, les systèmes d'intelligence en essaim sont par principe réactifs et manquent d'une vue d'ensemble indispensable à la résolution de problèmes qui requièrent des techniques de raisonnement approfondi.

Les informaticiens craignaient que les agents autonomes de type insecte ne deviennent incontrôlables dans les ordinateurs qu'ils habitent. Les nombreuses applications leur ont démontré que cette caractéristique est un avantage lorsqu'elle permet à de tels systèmes de s'adapter à des problèmes imprévus : cette flexibilité fait défaut aux logiciels classiques.

Ainsi, les insectes sociaux nous enseignent que des éléments réactifs et simples, correctement connectés dans un groupe, sont capables de produire des résultats intelligents : l'astuce réside dans la pertinence des connexions.

Éric BONABEAU est directeur scientifique à la Société Euro-Bios, à Paris. Guy THÉRAULAZ est éthologiste au CNRS, à l'Université Paul Sabatier, à Toulouse.

Éric BONABEAU, Marco DORIGO et Guy THÉRAULAZ, *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*, Oxford University Press, 1999.

L'énergie négative

LAWRENCE FORD • THOMAS ROMAN

On voyagerait à des vitesses supérieures à celle de la lumière si l'on maîtrisait une forme d'énergie inédite. Les lois de la physique qui indiquent l'existence de cette énergie «négative» semblent également en limiter les applications pratiques...

Une région de l'Univers peut-elle contenir moins que rien? La question semble absurde : une fois que l'on a éliminé la matière et le rayonnement, que retirer de plus? Toutefois, la physique quantique a souvent montré que l'intuition appréhende mal les phénomènes aux très petites échelles ou aux énergies considérables. Elle révèle qu'un volume peut contenir moins que rien, que la densité d'énergie (la quantité d'énergie par unité de volume) peut être négative.

Evidemment, une telle découverte a des conséquences étranges. D'après la théorie de la relativité générale, due à Albert Einstein, la présence de matière et d'énergie déforme l'espace-temps, et les forces d'attraction gravitationnelles ne sont que des conséquences des déformations de l'espace-temps dues à l'énergie ou à la masse classiques, positives. Si de l'énergie négative ou si de la masse négative (la matière «exotique») déformaient l'espace-temps, des phénomènes étranges apparaîtraient : des tunnels nommés trous de ver relierait des zones éloignées de l'Univers ; on pourrait voyager à des vitesses supérieures à celle de la lumière, et des machines pourraient faire remonter le temps. À l'aide d'énergie négative, on

pourrait même construire des machines à mouvement perpétuel ou détruire des trous noirs. Tous les ingrédients de *Star Trek* y sont.

Ces possibilités alertent les physiciens : la science-fiction a largement exploré les paradoxes engendrés par les voyages dans le passé (que se passerait-il si vous tuiez votre grand-père avant qu'il ne conçoive votre père?), et la matière exotique pose des questions fondamentales. Par exemple, quelles sont les propriétés de l'énergie négative? Quelques physiciens ont montré que la quantité et la durée de vie de l'énergie négative sont limitées. Au risque de décevoir, la physique prévoit que la construction de trous de ver dans l'Univers et les déplacements supraluminiques par déformation de l'espace-temps sont improbables.

Double négation

Avant d'aller plus loin, précisons que l'énergie négative n'est pas l'anti-matière, dont l'énergie est positive. Quand un électron heurte son antiparticule (le positon), ils se détruisent mutuellement, produisant des rayons gamma, dont l'énergie est positive. Si les antiparticules avaient une énergie

1. LES TROUS DE VER ont été considérés comme des ouvertures sphériques vers des régions éloignées de l'Univers. Bien que la création d'un tel trou de ver ne viole aucune des lois connues de la physique, elle nécessiterait la production de quantités tout à fait irréalistes d'énergie négative.



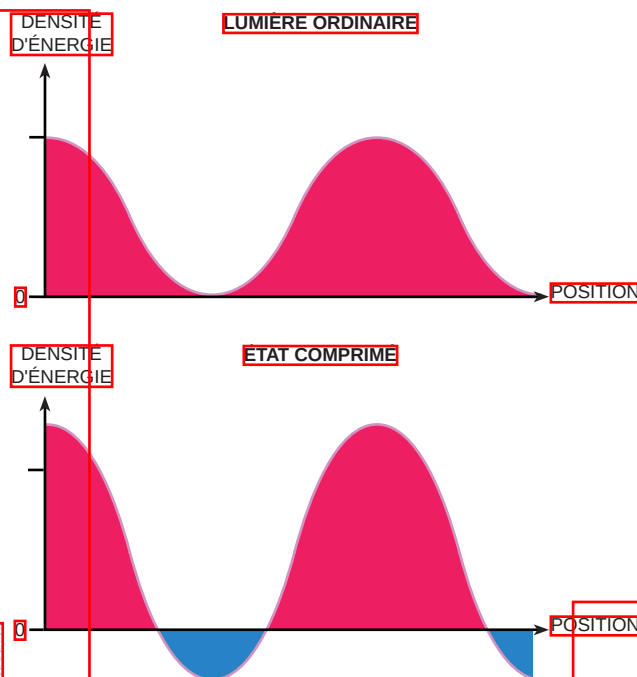


négative, l'annihilation ne libérerait aucune énergie. D'autre part, l'énergie négative n'est pas l'énergie associée à la constante cosmologique qui est postulée dans les théories inflatoires de l'Univers (voir *L'antigravité*, par Lawrence Krauss, *Pour la Science*, mars 1999). Cette constante correspond à une pression négative, mais à une énergie positive (certains physiciens nomment matière exotique toute matière ayant une pression négative, mais nous préférons réserver ce terme aux masses négatives).

Le concept d'énergie négative n'est pas pure imagination ; certains de ses effets ont même été produits en laboratoire. Ils découlent du principe d'incertitude d'Heisenberg, qui stipule que tout champ (électrique, magnétique, etc.) fluctue. Même quand la densité d'énergie est nulle en moyenne, comme dans le vide, elle n'est pas constamment nulle, de sorte que le vide réel n'est pas le vide qu'imaginait la physique classique ; c'est une mer agitée de particules «virtuelles» qui se créent et s'annihilent spontanément.

La notion habituelle d'énergie nulle correspond au vide soumis à toutes ces fluctuations, de sorte qu'en réduisant l'amplitude de ces dernières, le vide a moins d'énergie qu'il n'en possède normalement : c'est en ce sens qu'il a une énergie négative.

En optique quantique, par exemple, les physiciens ont créé des états particuliers de champs où des interférences quantiques destructrices suppriment les fluctuations du vide. Une énergie négative est présente dans ces états de «vide comprimé» ; plus précisément, ils sont associés à des régions où alternent énergie positive et énergie négative. L'énergie moyenne, sur tout l'espace, est positive, mais la compression du vide crée de l'énergie négative à un endroit donné en augmentant l'énergie ailleurs. Dans ces expériences, on envoie généralement des faisceaux laser à travers des matériaux optiques non linéaires, c'est-à-dire qui réémettent une longueur d'onde différente de la longueur d'onde qu'ils reçoivent



2. LES ONDES LUMINEUSES ont généralement une densité d'énergie positive ou nulle en différents points de l'espace (en haut). Cependant, dans un état «comprimé», la densité d'énergie à un instant donné peut devenir négative en certains points (en bas). En compensation, le pic de densité positive doit être augmenté.

(voir *La lumière silencieuse*, par Richard Slusher et Bernard Yurke, *Pour la Science*, juillet 1988). Le laser crée, dans le matériau, des paires de photons (ou «particules de lumière»). Ces photons renforcent et annulent alternativement les fluctuations du vide, conduisant à des zones d'énergie respectivement positive ou négative.

On produit également de l'énergie négative quand on introduit des limites géométriques dans un espace. En 1948, le physicien néerlandais Hendrik Casimir a montré que deux plaques de métal parallèles modifient les fluctuations du vide, de sorte qu'elles s'attirent. Après lui, des physiciens ont calculé que la densité d'énergie entre les plaques était négative. En effet, les plaques réduisent les fluctuations dans l'espace qui les sépare, ce qui crée une énergie et une pression négatives : les plaques sont attirées l'une vers l'autre. Plus les deux plaques sont proches, plus l'énergie et la pression sont négatives, et plus la force d'attraction est importante. Steve Lamoreaux, du Laboratoire de Los Alamos, Umar Mohideen et Anushree Roy, à l'Université de Riverside, ont récemment mesuré l'effet Casimir. Enfin, dans les années 1970, à Londres, Paul Davies et Stephen Fulling ont calculé qu'une frontière mobile, tel un miroir que l'on

déplacerait, produirait un courant d'énergie négative.

Dans le cas de l'effet Casimir comme dans celui des états comprimés, les physiciens n'ont mesuré que les effets indirects de l'énergie négative. La détection directe est plus difficile, mais pas impossible : Peter Grove et Adrian Ottewill, de l'Université d'Oxford, et l'un d'entre nous (L. Ford) ont proposé en 1992 de la réaliser au moyen des spins atomiques.

Pesanteur et légèreté

Le concept d'énergie négative apparaît dans plusieurs domaines de la physique moderne. On le trouve notamment quand on analyse les trous noirs, ces mystérieux objets dont le champ gravitationnel est si fort que rien ne s'échappe de leur voisinage, limité par un «horizon des événements». En 1974, à Cambridge, Stephen Hawking a calculé que les trous noirs devaient s'évaporer en émettant un rayonnement (voir *La mécanique quantique des trous noirs*, par Stephen Hawking, dossier hors série de la revue *Pour la Science*) : à chaque instant, un trou noir rayonne une quantité d'énergie proportionnelle au carré de sa masse. Bien que cette «évaporation» ne soit notable que pour les trous noirs de taille subatomique, elle assure l'équilibre thermique des trous noirs et de leur environnement.

Cette évaporation semble paradoxale. Puisque l'horizon des trous noirs est à sens unique, comment les trous noirs rayonnent-ils de l'énergie vers l'extérieur ? En raison de la conservation de l'énergie, la production d'énergie positive (que les observateurs lointains constatent sous forme de rayonnement de Hawking) est accompagnée d'un afflux d'énergie négative vers l'intérieur du trou noir : l'énergie négative est produite par la courbure de l'espace-temps à proximité du trou, qui perturbe les fluctuations du vide.

Les trous noirs ne sont pas les seules déformations de l'espace-temps où l'énergie négative semble jouer un rôle. Elle se retrouve également

dans les trous de ver, d'hypothétiques tunnels qui relient des régions éloignées de l'espace-temps. Naguère, les physiciens pensaient que les trous de ver étaient minuscules, apparaissant et disparaissant comme des particules virtuelles (voir *La gravitation quantique*, par Bryce Dewitt, *Pour la Science*, février 1984).

Au début des années 1960, les physiciens Robert Fuller et John Wheeler calculèrent que des trous de ver plus grands s'effondreraient si rapidement sous leur propre gravité que même un faisceau lumineux n'aurait pas le temps de les traverser. Toutefois, à la fin des années 1980, plusieurs physiciens, tels Michael Morris et Kip Thorne, de l'Institut de technologie de Californie, et Matt Visser, de l'Université de Washington, ont montré que certains trous de ver seraient assez grands pour laisser passer un être humain ou un vaisseau spatial : on

pourrait entrer dans un trou de ver à proximité de la Terre, parcourir une courte distance à pied dans ce trou de ver et ressortir dans la galaxie d'Andromède, par exemple... à condition de maîtriser l'énergie négative, qui correspond à une répulsion gravitationnelle et empêcherait le trou de ver de s'effondrer.

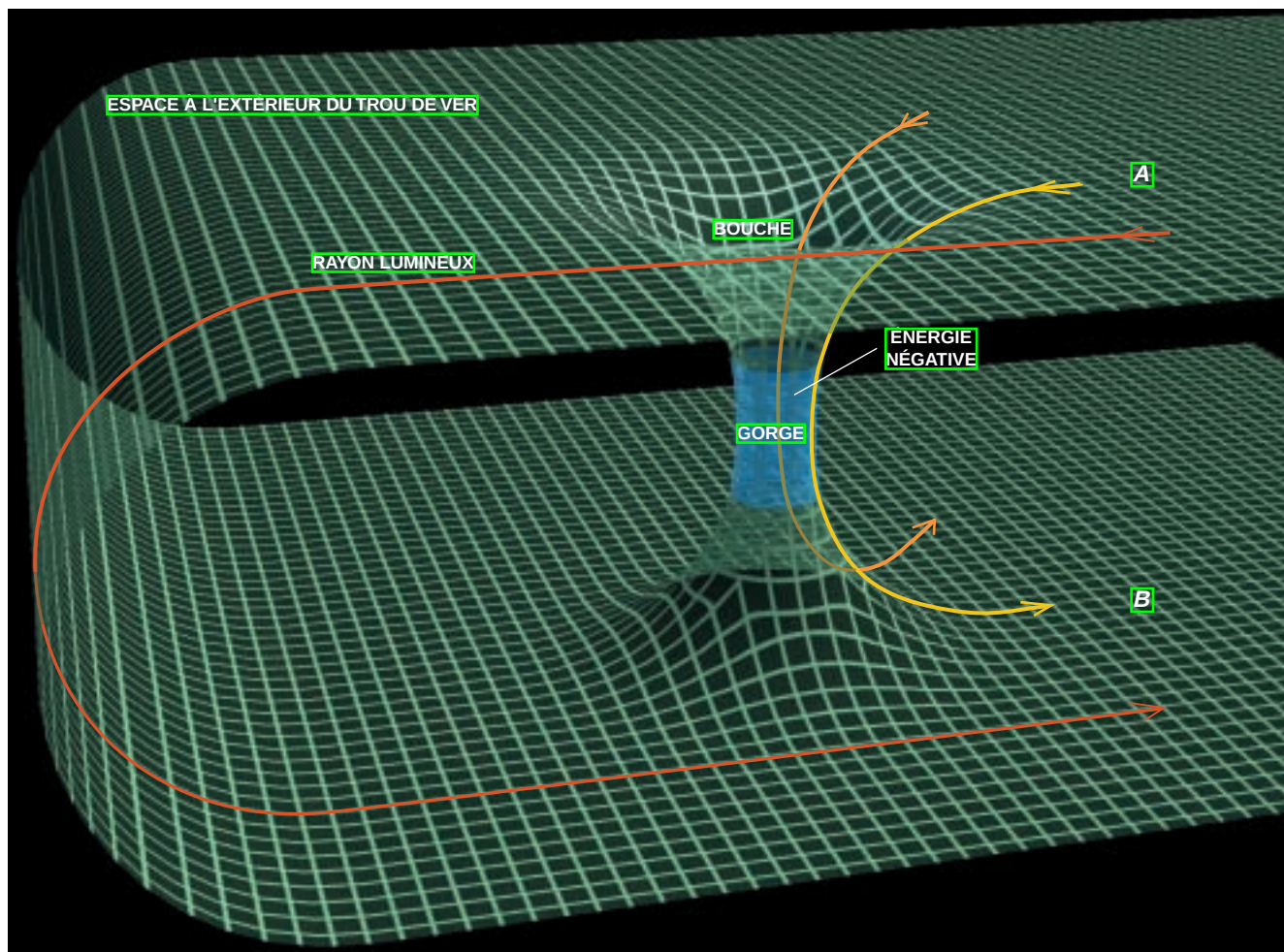
Un trou de ver n'est utilisable que s'il laisse passer des signaux sous forme de rayonnements électromagnétiques. Les rayonnements pénétrant dans l'une des bouches du trou de ver sont convergents, mais, pour ressortir, ils doivent se défocaliser ; autrement dit, ils doivent passer de la convergence à la divergence quelque part entre l'entrée et la sortie (voir la figure 3). Cette défocalisation nécessite de l'énergie négative : alors que la courbure de l'espace-temps induite par le champ gravitationnel, attractif, de la matière ordinaire agit comme

une lentille convergente, l'énergie négative agit comme une lentille divergente.

Plus vite que la lumière

Des déformations de l'espace-temps permettraient également des voyages à des vitesses supérieures à celle de la lumière. En 1994, à Cardiff, Miguel Alcubierre Moya a trouvé une solution aux équations d'Einstein qui présente un certain nombre de caractéristiques communes avec la propulsion supraluminique par déformation de l'espace-temps. Une telle solution correspond à une bulle d'espace-temps qui pourrait transporter un vaisseau interstellaire à des vitesses arbitrairement élevées par rapport à un observateur situé en dehors de la bulle. Là encore, l'énergie négative est la clé du phénomène.

Le principe de déplacement à des vitesses supérieures à celle de la



3. UN TROU DE VER est un tunnel entre deux régions éloignées de l'espace. Les rayons lumineux peuvent entrer par une des ouvertures du trou de ver et ressortir par l'autre ouverture. La propagation serait beaucoup plus longue si le rayonnement n'empruntait pas ce raccourci. Dans la gorge, de l'énergie négative (en bleu) doit être

présente pour faire diverger les rayonnements. Ce diagramme est une représentation bidimensionnelle, mais l'espace réel a trois dimensions ; les ouvertures et la partie centrale du trou de ver seraient en fait des sphères. Les trous de ver pourraient également relier entre eux deux points différents dans le temps.

lumière par déformation de l'espace-temps semble contraire à la théorie de la relativité restreinte, mais cette dernière stipule seulement qu'on ne peut pas se déplacer plus vite que la lumière en suivant la même trajectoire qu'elle ; si l'espace-temps est déformé, on peut aller finalement plus vite que la lumière sans dépasser localement la vitesse de la lumière, à condition d'emprunter des raccourcis de l'espace-temps. La contraction de l'espace-temps devant la bulle et l'expansion de l'espace-temps derrière la bulle réduisent la distance à parcourir, créant un tel raccourci (voir la figure 4).

La théorie de M. Alcubierre, très originale, ne résout toutefois pas complètement le problème du voyage supraluminique, car Sergueï Krasnikov, de l'Observatoire astronomique central de Pulkovo (près de Saint-Petersbourg), a calculé que l'intérieur de la bulle d'espace-temps déformé est causalement déconnecté

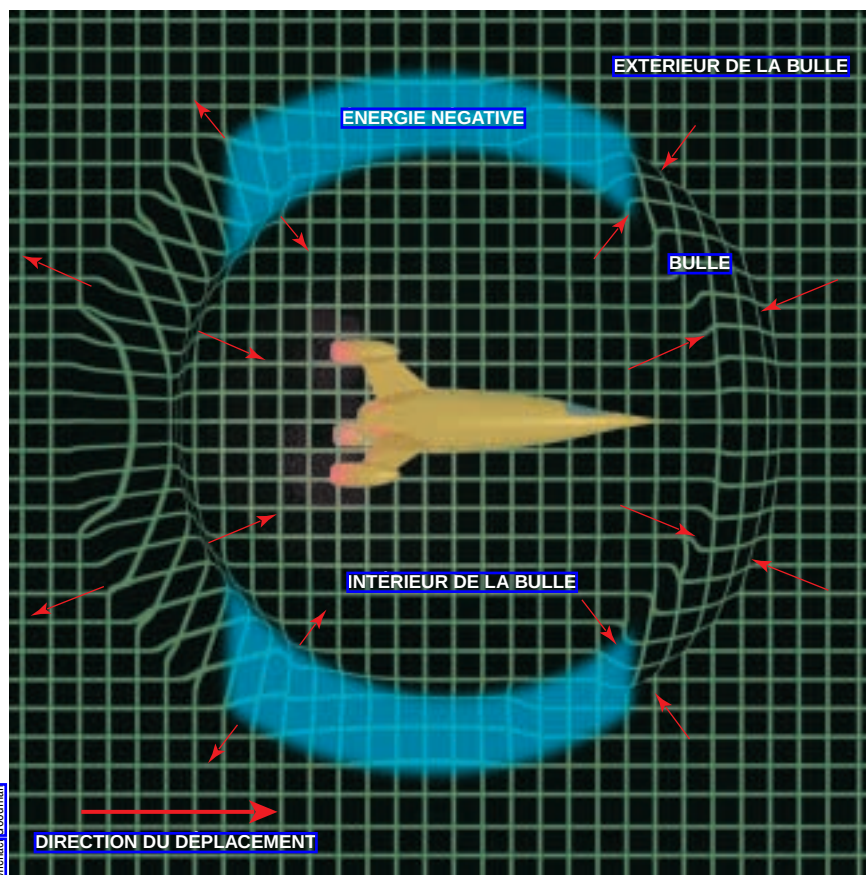
de l'extérieur. Le capitaine d'un vaisseau stellaire qui serait à l'intérieur d'une telle bulle ne pourrait ni la diriger, ni la supprimer, ni la recréer ; un agent extérieur doit la régler à l'avance. Afin de surmonter ce problème, S. Krasnikov a proposé l'utilisation de passages supraluminiques, des tubes d'espace-temps (différents des trous de ver) qui relieraient la Terre à des étoiles lointaines, par exemple. À l'intérieur du tube, le voyage à une vitesse supraluminique ne serait possible que dans un sens. En pratique, un vaisseau spatial quittant la Terre à une vitesse inférieure à celle de la lumière créerait ce tube ; puis il l'emprunterait au retour pour revenir vers la Terre à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Tout comme les bulles d'espace-temps, de tels tubes sont fondés sur l'énergie négative. Plus généralement, divers physiciens théoriciens ont calculé que tout principe qui ferait voyager plus vite que la lumière met en jeu de l'énergie négative.

Si l'on parvenait à construire des trous de ver ou des tubes de S. Krasnikov, on pourrait voyager dans le temps. En effet, l'écoulement du temps est relatif ; il dépend de la vitesse de l'observateur. Une personne quittant la Terre à bord d'un vaisseau spatial et voyageant à une vitesse proche de celle de la lumière est moins vieille, à son retour sur Terre, qu'une autre personne qui serait restée sur notre planète. Si le voyageur parvient à dépasser la lumière, par exemple en prenant un raccourci (un trou de ver ou une bulle de l'espace-temps), il peut revenir avant d'être parti. En 1988, M. Morris, K. Thorne et Ulvi Yurtsever ont proposé une machine à voyager dans le temps fondée sur ce principe du trou de ver, et leur article est beaucoup étudié depuis dix ans. En 1992, S. Hawking a prouvé que la construction d'une machine temporelle dans une région finie de l'espace-temps nécessitait de l'énergie négative.

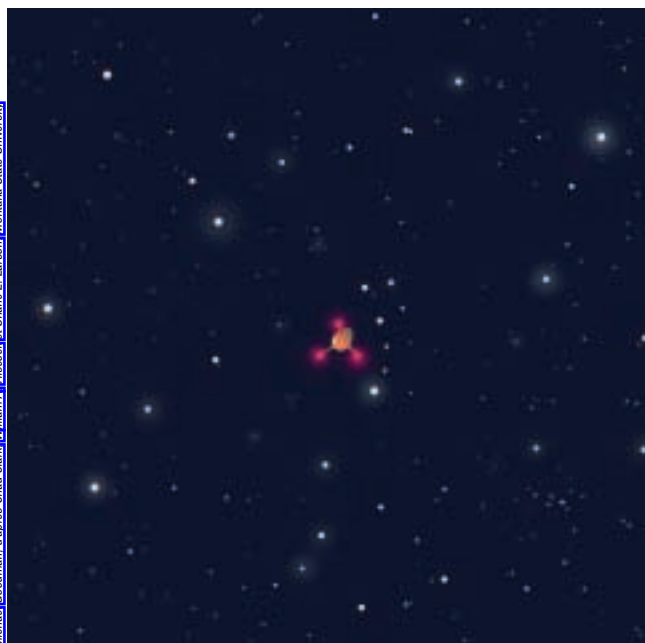
L'énergie négative est une notion si étrange qu'on admet difficilement qu'elle ne viole aucune des lois de la physique. Pourtant, avant et après la création de quantités égales d'énergie négative et positive dans un espace initialement vide, l'énergie totale est nulle : le principe de conservation de l'énergie est satisfait. Certes, ce respect est insuffisant, car de nombreux autres phénomènes où l'énergie est conservée ne sont jamais observés dans la réalité : les verres brisés ne se réparent pas d'eux-mêmes, et la chaleur ne diffuse pas spontanément d'un corps froid à un corps plus chaud.

De tels effets sont exclus par le deuxième principe de la thermodynamique, qui stipule que la mesure du désordre d'un système (son entropie) ne décroît pas spontanément, sans un apport d'énergie. Ainsi, un réfrigérateur consomme de l'énergie pour extraire de la chaleur de son intérieur déjà froid vers l'extérieur, plus chaud. De même, le deuxième principe interdit la transformation complète de la chaleur en travail mécanique.

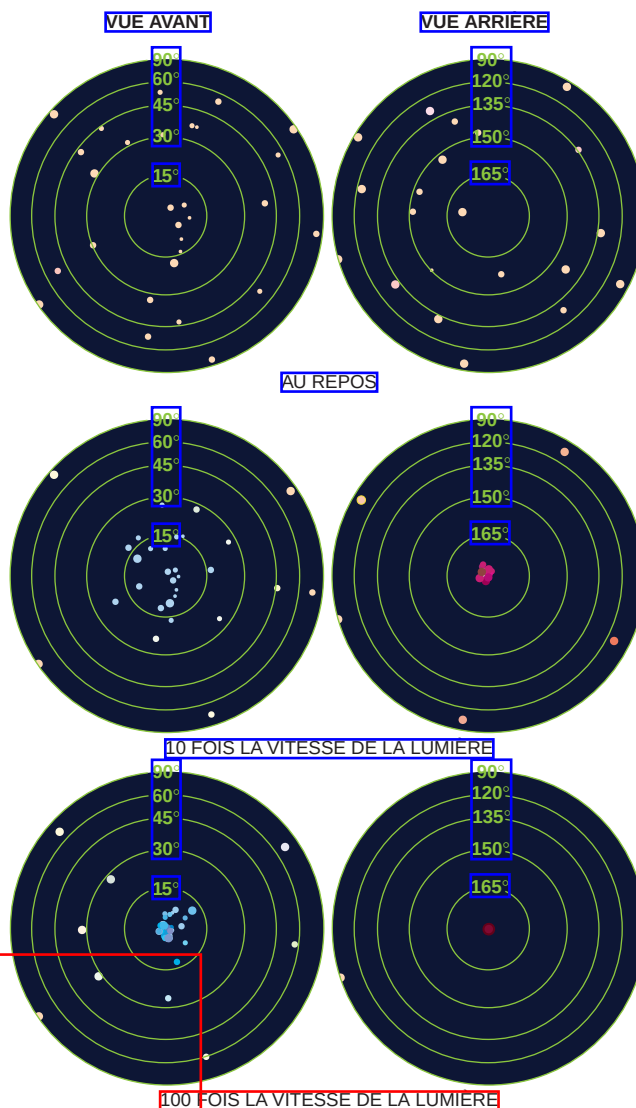
L'existence d'énergie négative semble opposée au deuxième principe. Imaginons un laser d'un type nouveau, qui émettrait un faisceau stationnaire d'énergie négative. La conservation de l'énergie imposerait, en contrepartie, la création d'un faisceau stationnaire d'énergie positive. Pourrait-on pointer le faisceau d'énergie négative vers



4. DES BULLES D'ESPACE-TEMPS permettraient des voyages à vitesse supérieure à la vitesse de la lumière. Elles pourraient transporter des vaisseaux spatiaux à des vitesses arbitrairement élevées. L'espace-temps serait contracté à l'avant de la bulle, réduisant ainsi la distance qui la sépare de sa destination, et dilaté à l'arrière, accroissant la distance qui la sépare de son point de départ (flèches). Le vaisseau lui-même ne bouge pas par rapport à l'espace immédiatement autour de lui ; les membres d'équipage ne ressentent aucune accélération. Une telle bulle nécessite de l'énergie négative (en bleu), sur les flancs de la bulle.



5. DANS UN VAISSEAU STELLAIRE qui se déplacerait plus vite que la lumière en direction de la Petite Ourse (*ci-dessus*), on ne verrait pas les zébrures classiquement représentées par les films de science-fiction, mais une scène analogue à celle qui est montrée ici. Tandis que la vitesse augmente (*à droite*), les étoiles situées devant le vaisseau (*colonne de gauche*) semblent de plus en plus proches de la direction du mouvement et leur couleur vire au bleu. Derrière le vaisseau (*colonne de droite*), les étoiles se rapprochent d'une position directement à l'arrière, rougissent et finissent par disparaître complètement. La lumière provenant d'étoiles situées directement au-dessus ou au-dessous est inchangée.



une région lointaine de l'Univers, tandis que l'énergie positive serait utilisée à des fins pratiques? Cette source apparemment inépuisable d'énergie pourrait servir à la réalisation d'une machine à mouvement perpétuel, qui violerait le deuxième principe. Par exemple, en pointant le faisceau vers un verre d'eau, on rafraîchirait l'eau, tandis que l'énergie positive extraite alimenterait un petit moteur : on obtiendrait ainsi un réfrigérateur qui fonctionnerait sans apport d'énergie. En réalité, une impossibilité survient, non pas en raison de l'idée d'énergie négative, mais parce que l'on ne peut pas séparer sans restriction l'énergie négative et l'énergie positive.

L'existence d'énergie négative aurait également des conséquences importantes en cosmologie. Quand l'énergie dégagée par les réactions thermonucléaires devient insuffisante pour équilibrer l'attraction gravitationnelle des étoiles, celles-ci s'effondrent sur elles-mêmes et forment parfois un trou noir : une «singularité» de l'espace-temps qui correspond à une région de l'espace où l'intensité du champ de gravitation devient infinie. La relativité générale (et les autres lois de la physique) n'in-

diquent pas comment l'Univers évolue dans cette région : cette ignorance est une des grandes lacunes de la description mathématique de la nature. Tant que la singularité reste à l'intérieur d'un horizon des événements, on peut décrire l'Univers à l'extérieur de cet horizon. C'est pour cette raison que Roger Penrose, à Oxford, a proposé l'hypothèse de «censure cosmique» : aucune singularité n'est nue, c'est-à-dire sans horizon des événements.

Pour certains types de trous noirs électriquement chargés ou en rotation, connus sous le nom de trous noirs extrêmes, une infime augmentation de la charge ou de la vitesse de rotation, ou une diminution de la masse, détruiraient l'horizon des événements et transformeraient le trou noir en une singularité nue. L'augmentation de la charge ou de la vitesse de rotation de ces trous noirs à l'aide de matière ordinaire semble irréalisable pour diverses raisons. En revanche, on pourrait réduire la masse du trou noir en bravant un faisceau d'énergie négative sur le trou, ce qui mettrait en défaut

le principe de la censure cosmique. On créerait un tel faisceau à l'aide d'un miroir mobile, par exemple. En principe, une infime quantité d'énergie négative suffirait à changer radicalement l'état d'un trou noir extrême. C'est ainsi que l'énergie négative aurait le plus de chances de produire des effets macroscopiques.

Ni isolé ni de même amplitude

Malheureusement (ou heureusement, selon le point de vue), bien que la théorie quantique admette l'existence d'énergie négative, elle prescrit des limites à son amplitude et à sa durée. Ces inégalités quantiques ont été évoquées pour la première fois par L. Ford, en 1978 ; depuis, elles ont été démontrées et affinées.

Ces inégalités ressemblent au principe d'incertitude d'Heisenberg. Elles stipulent qu'un faisceau d'énergie

négative ne peut pas être arbitrairement intense pendant un temps arbitrairement long. L'amplitude de l'énergie négative est inversement proportionnelle à son étendue spatio-temporelle : une impulsion intense d'énergie négative ne dure qu'un temps très bref ; une impulsion faible dure plus longtemps. De surcroît, une impulsion initiale d'énergie négative est nécessairement suivie d'une impulsion d'énergie positive d'intensité supérieure (voir la figure 6). Plus l'amplitude de l'énergie négative est importante, plus sa contrepartie en énergie positive doit arriver peu de temps après. On peut se représenter l'énergie négative comme un prêt énergétique : de la même manière qu'une dette est de l'argent négatif que l'on doit rembourser, l'énergie négative est un déficit d'énergie qui doit être compensé. Examinons comment l'analogie se prolonge.

Dans l'effet Casimir, la densité d'énergie négative entre les deux plaques peut persister indéfiniment, mais la densité d'énergie négative n'est notable que si l'écart entre les plaques est très faible : la densité d'énergie négative est inversement proportionnelle à la puissance quatrième de la distance entre les plaques. Les inégalités quantiques indiquent que la densité d'énergie entre les plaques peut être rendue encore plus négative que la valeur observée dans l'effet Casimir, mais seulement temporairement ; plus on réduit la densité d'énergie au-dessous de la valeur Casimir, plus bref est l'état obtenu.

Les inégalités quantiques imposent que les tailles des trous de ver et des tubes de S. Krasnikov soient submicroscopiques ou que l'énergie négative soit restreinte à des bandes extrêmement étroites. En 1996, nous avons calculé que les trous de ver submicroscopiques auraient un rayon inférieur à 10^{-32} mètre environ. Cette longueur est légèrement

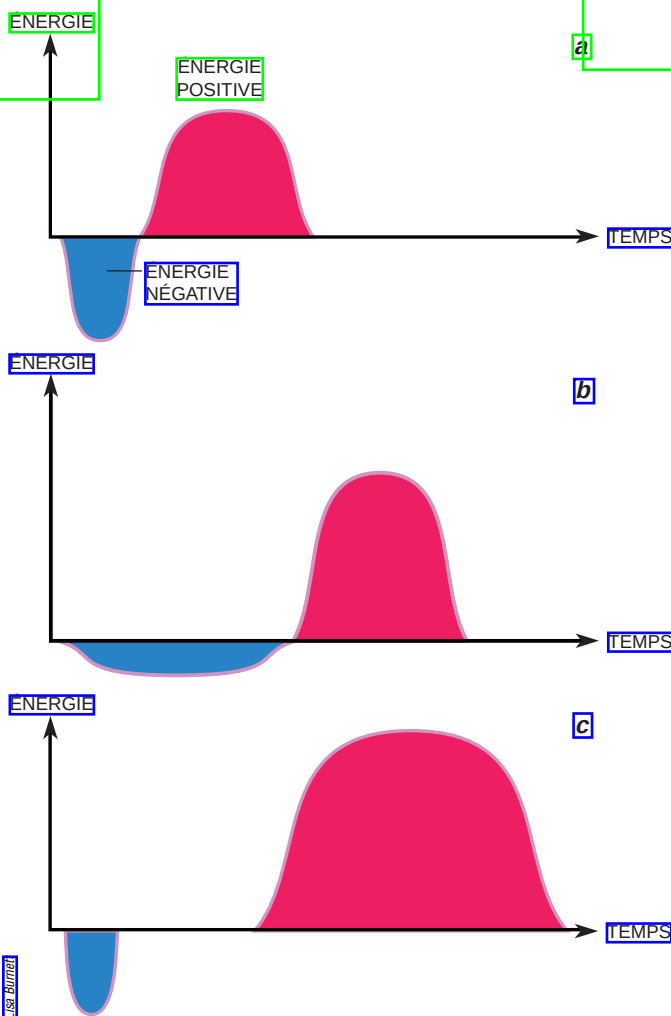
supérieure à la longueur de Planck 10^{-35} mètre, qui est la plus petite longueur possible ayant un sens physique. Nous avons calculé que l'on pourrait créer des trous de ver macroscopiques si l'on confinait l'énergie négative dans un intervalle extrêmement étroit autour de l'entrée du trou. Par exemple, sous certaines hypothèses, on détermine qu'un trou de ver dont le rayon d'entrée est égal à un mètre contraint l'énergie négative à n'être que dans un intervalle de 10^{-21} mètre, un million de fois plus petit que la taille d'un proton. D'après les estimations de M. Visser, l'énergie négative nécessaire à un trou de ver de cette taille correspond à l'énergie totale émise par dix milliards d'étoiles en un an. Les problèmes sont analogues avec les trous de ver plus

gros. Avec les mêmes hypothèses, l'épaisseur maximale possible de l'intervalle d'énergie négative est proportionnelle à la racine cubique du rayon d'entrée. En augmentant le rayon d'entrée jusqu'à une année-lumière, l'énergie négative reste confinée à une région plus petite que le rayon d'un proton, et la quantité totale nécessaire augmente linéairement avec la taille du trou d'entrée.

Ceux qui voudront maîtriser les trous de ver devront résoudre le difficile problème de confiner de grandes quantités d'énergie négative dans des volumes extrêmement minces. Certaines théories cosmologiques supposent l'existence de «cordes cosmiques», où de très fortes densités d'énergie sont réparties le long de longues lignes étroites, mais tous les modèles de cordes cosmiques physiquement acceptables ont des densités d'énergie positives.

La propulsion par déformation de l'espace-temps semble encore plus difficile. Le modèle de M. Alcubierre, qui considère une bulle d'espace-temps qui se déplacerait dix fois plus vite que la lumière, impose des parois d'une épaisseur maximale de 10^{-32} mètre. Une bulle ne pourrait contenir un vaisseau stellaire de 200 mètres de long que si la quantité totale d'énergie négative était équivalente à dix milliards de fois la masse de l'Univers observable. Les difficultés sont analogues pour le tube supraluminique de S. Krasnikov. Chris Van Den Broeck, à Louvain, a récemment modifié le modèle de M. Alcubierre. Moins d'énergie négative est nécessaire, mais le vaisseau stellaire doit alors rentrer dans une bouteille d'espace-temps courbé dont le goulot aurait moins de 10^{-32} mètre de diamètre. Ainsi, au total, la construction de trous de ver et de couloirs d'espace-temps utilisables semble très improbable.

Les inégalités quantiques empêchent la violation du deuxième principe. Quand on essaie de refroidir

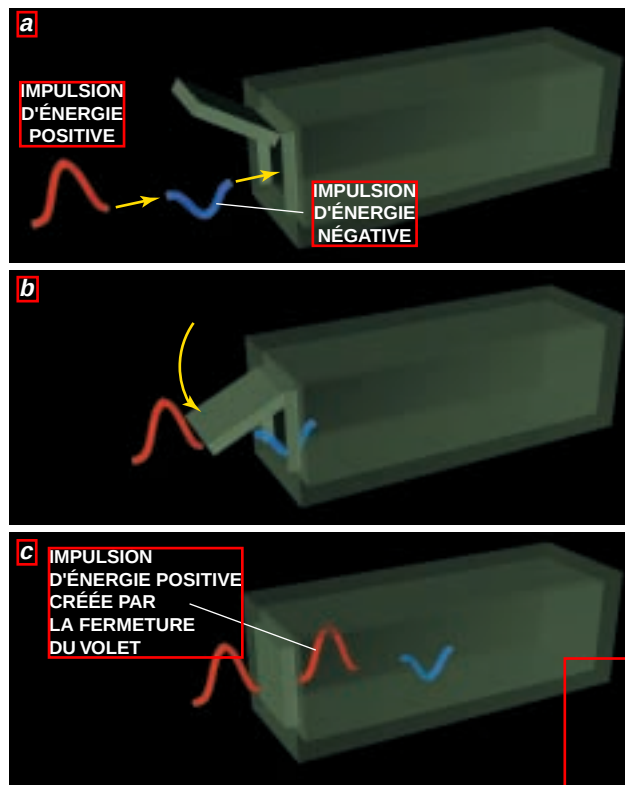


6. DES IMPULSIONS D'ENERGIE NEGATIVE sont envisageables, mais sous certaines conditions. Premièrement, plus l'impulsion est longue, plus elle doit être faible (a,b). Deuxièmement, elle doit être suivie d'une impulsion d'énergie positive. L'amplitude de l'impulsion positive est nécessairement supérieure à celle de l'impulsion négative initiale. Troisièmement, plus les deux impulsions sont séparées dans le temps, plus l'impulsion positive doit être importante : cet effet est nommé «intérêt quantique» (c).

dir un objet chaud à l'aide d'une impulsion d'énergie négative, l'objet est presque immédiatement réchauffé par une impulsion supérieure d'énergie positive. La contrepartie positive d'une faible impulsion d'énergie négative pourrait être différée, mais les effets de l'énergie négative seraient alors indiscernables de ceux des fluctuations thermiques normales. Apparemment, on ne peut ni capter l'énergie négative ni la dissocier de l'énergie positive. On a cherché si l'énergie négative serait piégée par une boîte munie d'un volet, vers laquelle on dirigerait un faisceau d'énergie négative; toutefois la fermeture du volet crée un flux d'énergie positive qui neutralise l'énergie négative (voir la figure 7).

Flash cosmique et intérêts quantiques

Nous avons montré l'existence de restrictions analogues pour la violation de la censure cosmique. L'injection d'une impulsion d'énergie négative dans un trou noir chargé détruirait momentanément l'horizon des événements, faisant exploser la singularité qu'il contient. Cependant cette impulsion étant nécessairement suivie d'une impulsion d'énergie positive, la singularité nue serait immédiatement retransformée en un trou noir; nous nommons un tel phénomène un «flash cosmique». Pour observer ce flash cosmique, on doit augmenter l'écart temporel entre l'énergie négative et l'énergie positive, afin que la singularité reste nue le plus longtemps possible. Or, dans ce cas, l'amplitude de l'impulsion d'énergie négative serait nécessairement très faible, en raison des inégalités quantiques. Le changement de masse du trou noir, dû à l'énergie négative, serait alors noyé dans le bruit des fluctuations quantiques normales de la masse du trou noir, qui sont la conséquence naturelle du principe d'incertitude d'Heisenberg. Le spectacle de la singularité nue serait brouillé, si bien qu'un observateur lointain ne pourrait vérifier sans ambiguïté la violation de la censure cosmique. Avec Frans Pretorius, de l'Université



7. CET ESSAI DE CONTOURNEMENT des lois quantiques qui gouvernent l'énergie négative est voué à l'échec. L'expérimentateur tente de séparer une impulsion d'énergie négative de l'impulsion compensatoire d'énergie positive. Tandis que les impulsions s'approchent d'une boîte (a), l'expérimentateur cherche à isoler l'impulsion négative en fermant le couvercle dès qu'elle est entrée (b). Cependant la fermeture du couvercle crée une seconde impulsion d'énergie positive à l'intérieur de la boîte (c).

de Victoria, nous avons récemment montré que les inégalités quantiques conduisent à des limitations encore plus strictes concernant l'énergie négative. L'impulsion positive qui suit obligatoirement une impulsion initiale négative doit plus que compenser l'impulsion négative; elle doit surcompenser. La quantité de surcompensation nécessaire augmente avec l'intervalle de temps entre les deux impul-

sions. Aussi les impulsions négatives et positives ne peuvent-elles jamais s'annuler exactement; l'énergie positive dominera toujours. On nomme «intérêt quantique» cet effet de surcompensation. Autrement dit, si l'on considère l'énergie négative comme un prêt d'énergie, le prêt doit être remboursé avec les intérêts. Plus la période sur laquelle le prêt aura été accordé est longue, ou plus le montant du prêt est important, plus les intérêts sont élevés. En outre, plus le prêt est important, moins son remboursement peut être différé: Dame Nature est une banquière implacable qui n'éponge aucune dette.

Le concept d'énergie négative intervient dans de nombreux domaines de la physique: la gravitation, la théorie quantique, la thermodynamique. L'existence d'un lien entre ces domaines montre que les lois de la nature ont une structure logique contrainte. D'un côté, l'existence d'énergie négative semble être le seul moyen de relier les trous noirs

et la thermodynamique. D'un autre côté, la physique quantique interdit la production illimitée d'énergie négative, qui violerait le deuxième principe de la thermodynamique. Les physiciens cherchent aujourd'hui si ces restrictions font également partie intégrante d'une théorie sous-jacente plus puissante, telle une théorie unifiée de la gravitation. La nature, n'en doutons pas, nous réserve encore bien des surprises.

Lawrence FORD est professeur de physique à l'Université Tufts. Thomas ROMAN est professeur de physique à l'Université du Connecticut.

Jean-Pierre LUMINET, *Les trous noirs*, Éditions du Seuil, 1992.

Kip S. THORNE, *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*, W.W. Norton, 1994.

Lawrence FORD et Thomas ROMAN, *Quantum Field Theory Constrains Traversable Wormhole Geometries*, in *Physical Review D*, vol. 53, n° 10, pp. 5496-5507, 15 mai 1996.

Matt VISSER, *Lorentzian Wormholes: From*

Einstein to Hawking, American Institute of Physics Press, 1996.

M.J. PFENNING et L.H. FORD, *The Unphysical Nature of Warp Drive*, in *Classical and Quantum Gravity*, vol. 14, n° 7, pp. 1743-1751, juillet 1997.

Paul DAVIES, *Paradox Lost*, in *New Scientist*, vol. 157, n° 2126, p. 26, 21 mars 1998.

Paul J. NAHIN, *Time Machines: Time Travel in Physics, Metaphysics, and Science Fiction*, seconde édition, AIP Press, Springer-Verlag, 1999.

Lawrence FORD et Thomas ROMAN, *The Quantum Interest Conjecture*, in *Physical Review D*, vol. 60, n° 10, article n° 104018 (8 pages), 15 novembre 1999.

L'horloge biologique

MICHAEL YOUNG

Des horloges internes commandent le métabolisme et les comportements des êtres vivants. On découvre qu'elles fonctionnent de manière analogue chez la mouche, chez la souris et dans l'espèce humaine.

Le 26 mars 2000, quand la France est passée à l'heure d'été, certains d'entre nous ont eu peine à s'adapter. Pourquoi? Et pourquoi les voyages en avion dérèglent-ils notre métabolisme? Parce que l'horloge biologique qui commande les cycles de l'organisme est alors perturbée; elle ne se règle qu'après plusieurs jours passés dans le nouvel environnement.

Les êtres humains ne sont pas les seuls à souffrir du décalage horaire, car la plupart des organismes vivants ont une horloge biologique. Que perturbent exactement les décalages horaires? Quels sont les mécanismes – physiologiques et moléculaires –

qui sous-tendent la périodicité du fonctionnement de l'organisme? Pour répondre à ces questions, nous exposons des drosophiles à des simulacres de décalages horaires. Ainsi, nous identifions et étudions les fonctions de plusieurs gènes qui constituent les ressorts et les engrenages de l'horloge biologique. Les gènes découverts, nous déterminons les protéines qu'ils codent: ces protéines seront des cibles potentielles de traitement contre les troubles du sommeil ou contre les dépressions saisonnières.

L'horloge humaine

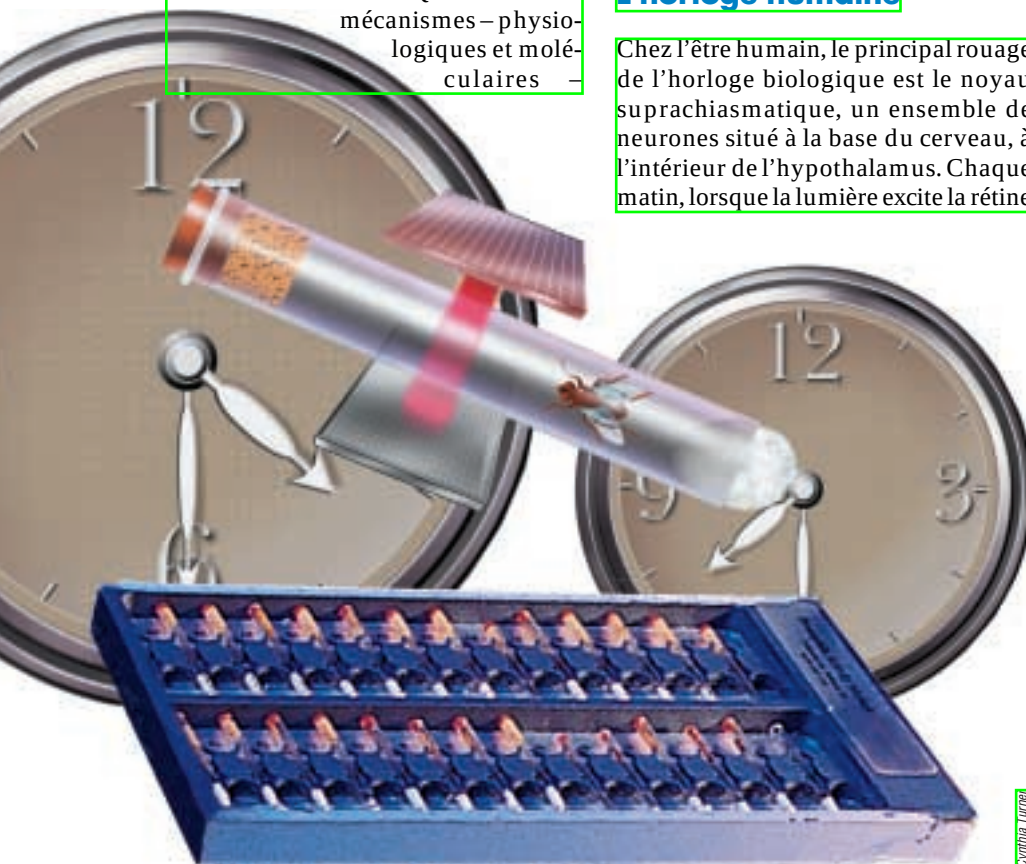
Chez l'être humain, le principal rouage de l'horloge biologique est le noyau suprachiasmatique, un ensemble de neurones situé à la base du cerveau, à l'intérieur de l'hypothalamus. Chaque matin, lorsque la lumière excite la rétine

de l'œil, des nerfs particuliers stimulent le noyau suprachiasmatique, qui commande alors la production de nombreuses substances biologiquement actives. Par exemple, il stimule une zone cérébrale voisine, l'épiphyse, qui synthétise de façon cadencée de la mélatonine, l'«hormone du sommeil». Plus la journée avance, plus l'épiphyse fabrique de mélatonine: la température corporelle diminue alors progressivement et l'organisme réclame le sommeil.

Bien que la lumière recale l'horloge biologique chaque jour, le rythme jour / nuit, ou rythme circadien, persiste chez des individus privés de lumière: l'activité du noyau suprachiasmatique est donc innée. Au début des années 1960, Jürgen Aschoff et ses collègues de l'Institut Max Planck, à Seewiesen, en Allemagne, avaient observé que des volontaires privés de repères temporels conservaient un cycle veille / sommeil de 25 heures environ.

Plus récemment, Charles Czeisler, Richard Kronauer et leurs collègues de l'Université Harvard ont montré que le cycle circadien de notre espèce est plutôt de 24 heures et 18 minutes: ils ont étudié 24 hommes et femmes, âgés de 20 à 60 ans, qui ont vécu plus de trois semaines dans un environnement sans autre repère de temps qu'un cycle lumière / pénombre peu contrasté de 28 heures et qu'un signal qui indiquait l'heure de se coucher.

En mesurant la température du corps et les concentrations sanguines en mélatonine et en cortisol (une hormone de stress dont la synthèse diminue le soir), les biologistes ont observé que, malgré la prolongation anormale de la durée diurne, les sujets continuaient de vivre selon leur propre horloge circadienne interne. Contrairement à ce que des études précédentes



1. LES DROSOPHILES sont enfermées dans des tubes pourvus de nourriture et bouchés par du coton perméable à l'air. Disposés sur un plateau, les tubes sont traversés par un faisceau de lumière infrarouge qui détecte l'activité des insectes.

semblaient montrer, l'horloge biologique ne vieillit pas : chez les individus les plus âgés du groupe testé, les rythmes étaient aussi réguliers que chez les plus jeunes.

Toutefois, les études menées sur des individus isolés ne révèlent pas les mécanismes moléculaires de l'horloge biologique. Les biologistes préfèrent étudier les drosophiles (ou mouches du vinaigre), car elles ont une durée de vie brève et sont de petite taille : ainsi, en laboratoire, les biologistes en élèvent et en croisent des milliers jusqu'à l'apparition de mutations intéressantes, qu'ils favorisent grâce à des composés nommés mutagènes.

Le cycle des mouches

Les premières mouches mutantes dont les rythmes circadiens étaient altérés ont été identifiées au début des années 1970 à l'Institut de technologie de Californie : Ron Konopka et Seymour Benzer ont observé le comportement de 2 000 mouches parmi la descendance de quelques individus exposés à un

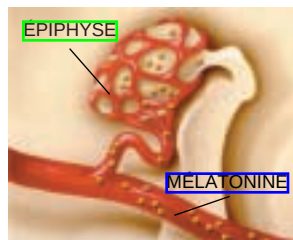
mutagène. Ils élevaient des drosophiles dans deux incubateurs de la taille d'un réfrigérateur. À l'intérieur, la lumière suit un rythme périodique, avec un « lever de soleil » à six heures du matin et un « coucher du soleil » à six heures du soir. Les deux incubateurs sont décalés de trois heures ; la température y est fixée à 25 degrés.

D'un incubateur à l'autre, les mouches effectuent des voyages simulés à l'intérieur de petits tubes de verre disposés sur des plateaux spéciaux qui suivent leurs mouvements grâce à un faisceau de lumière infrarouge. Les tubes contiennent de la nourriture, et un bouchon en coton laisse passer l'air (voir la figure 1). Chaque fois qu'une mouche se déplace dans le faisceau, elle projette une ombre sur un récepteur du plateau relié à un ordinateur qui enregistre l'activité. Un vol en avion de cinq heures est ainsi remplacé par un simple déplacement de quelques mètres.

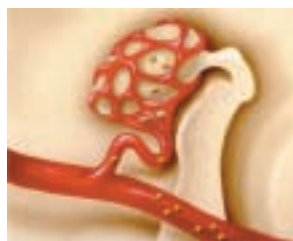
Grâce à ces appareillages, R. Konopka et S. Benzer ont découvert que la plupart des animaux gardaient un

rythme circadien normal de 24 heures, avec 12 heures d'activité et 12 heures de repos. Toutefois, trois mouches avaient un comportement anormal, dû à des mutations : l'une avait un cycle de 19 heures, une autre un cycle de 28 heures, et la troisième n'avait aucun rythme circadien (elle se reposait ou s'activait de façon aléatoire). Quels gènes avaient-ils été endommagés ?

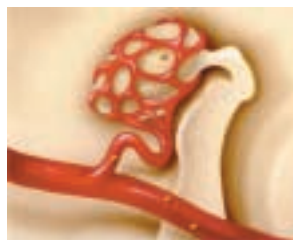
En 1984, trois équipes – dont la nôtre – ont identifié le gène muté chez les trois mouches anormales. Deux ans plus tard, nous avons montré que les trois mouches portaient trois altérations différentes de ce même gène, nommé *per*. Nous en avons déduit que la périodicité circadienne des mouches et la valeur exacte de la période dépendent de ce gène *per*. Agit-il seul ? En observant plus de 7 000 mouches, mes collègues Amita Sehgal et Jeffrey Price ont isolé une mouche dépourvue de rythme circadien, mais dont la mutation se trouvait sur le chromosome 2, alors que la gène *per* est sur le chromosome X. Le nouveau gène a été nommé *tim*.



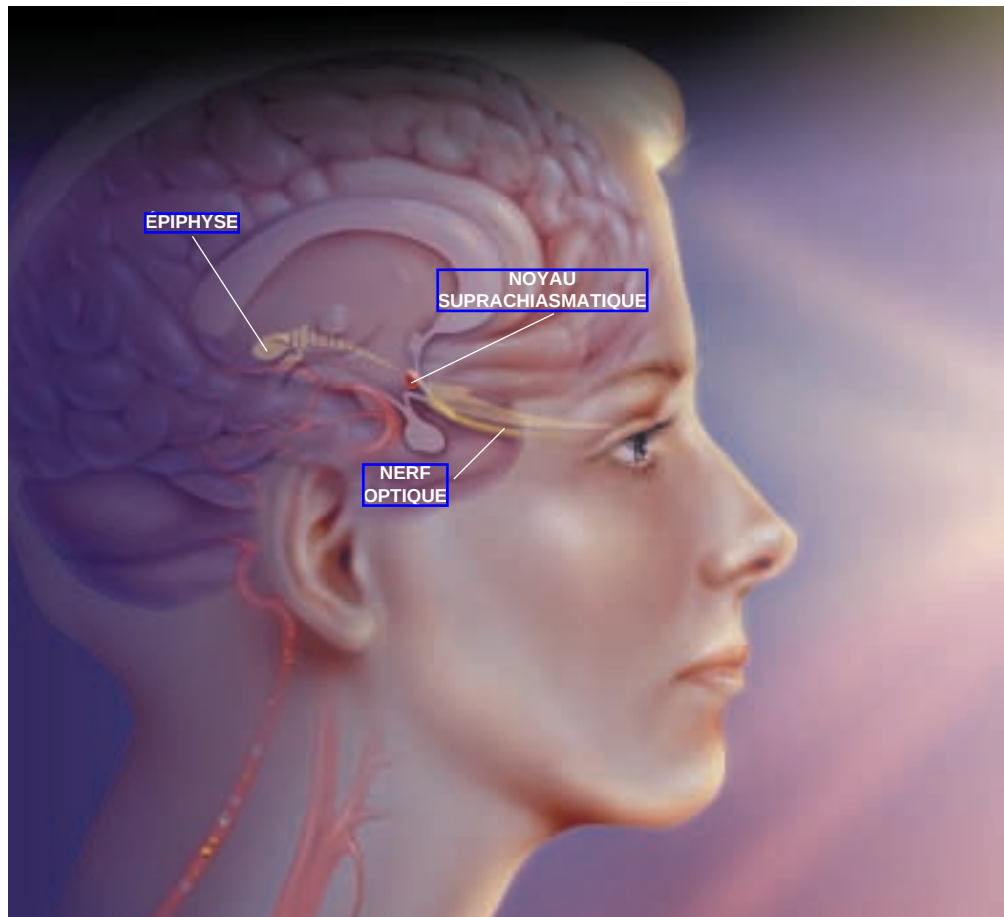
LE MATIN AVANT L'OUVERTURE DES YEUX



PEU APRÈS UNE EXPOSITION À LA LUMIÈRE



PLUS TARD DANS LA JOURNÉE



2. L'ŒIL, ÉCLAIRÉ PAR LA LUMIÈRE DU MATIN, envoie un signal, par le nerf optique, à une structure nommée noyau suprachiasmatique. Celui-ci transmet ensuite l'information à l'épiphyse, située

dans le cerveau (à gauche). Celle-ci réduit alors sa synthèse de mélatonine, une hormone qui joue un rôle dans l'induction du sommeil.

Les gènes sont des segments d'ADN qui contiennent, sous forme codée, les instructions avec lesquelles les cellules fabriquent les protéines. L'ADN ne quitte jamais le noyau de la cellule : les gènes sont «transcrits», c'est-à-dire copiés sous forme d'ARN

messenger, qui passe du noyau au cytoplasme, où les protéines sont ensuite fabriquées. À partir des gènes *per* et *tim*, nous avons synthétisé les protéines PER et TIM qu'ils codent. Réunies dans une même solution, ces deux protéines se liaient : nous avons

supposé qu'elles interagissaient à l'intérieur des cellules.

Les expériences suivantes l'ont confirmé : la production des protéines PER et TIM est réglée par une boucle de rétroaction. Plus précisément, l'activité des gènes *per* et *tim* persiste jusqu'à ce que les concentrations en protéines PER et TIM soient suffisamment élevées ; les deux protéines s'associent alors, formant des complexes qui pénètrent dans le noyau et y inhibent les gènes *per* et *tim*. Après quelques heures, des enzymes dégradent ces complexes, les gènes s'expriment de nouveau, et le cycle recommence.

Des horloges omniprésentes

Le cerveau n'est pas le seul organe responsable des rythmes circadiens. À l'Université d'Oregon, Jadwiga Giebultowicz a identifié des protéines PER et TIM dans les tubules malpighiens – l'analogue des reins – des drosophiles. La synthèse cyclique de ces protéines persiste chez des mouches décapitées : les cellules malpighiennes ne sont donc pas commandées par le cerveau.

De surcroît, en transférant à des mouches vivantes des gènes qui codent des protéines

PER fluorescentes, Steve Kay et ses collègues de l'Institut de recherche Scripps ont montré que des horloges biologiques existent dans les ailes, les pattes, la région buccale et les antennes des drosophiles. Ces horloges fonctionnent même lorsque chaque tissu est dissocié de l'insecte.

Par ailleurs, en 1998, Ueli Schibler, à l'Université de Genève, a montré en 1998 que les gènes *per* des cellules de tissu conjonctif de rat suivent un cycle circadien.

La diversité des différents types de cellules soumis à une activité d'horloge circadienne indique que la correction du temps est suffisamment importante pour en garder la trace localement.



La tête d'une drosophile a plusieurs horloges biologiques : des cellules prélevées sur la région buccale et les antennes (structures entre les yeux à facettes) montrent la même réaction aux cycles de lumière et d'obscurité que celles du cerveau.

Remettre les pendules à l'heure

Comment cette horloge est-elle recalée par les signaux lumineux ? Chaque fois qu'une mouche est transportée d'un incubateur sombre à un incubateur éclairé, les protéines TIM présentes dans le cerveau disparaissent en quelques minutes. De plus, le type de décalage qu'elle subit détermine les quantités de leurs protéines TIM : chez les mouches transférées d'un incubateur où il est 20 heures, heure locale – il fait donc nuit – vers l'autre incubateur où le jour dure encore une heure, les protéines TIM disparaissent rapidement, puis s'accumulent de nouveau quand les lumières s'éteignent à 18 heures. Après avoir été stoppées, les horloges moléculaires des mouches s'adaptent à l'heure de la nouvelle zone.

À l'inverse, les mouches transportées d'un incubateur où il est quatre heures du matin vers le second incubateur, où il est sept heures, subissent un lever de soleil prématuré : la quantité de protéines TIM diminue également, mais sans augmenter ensuite, car l'horloge moléculaire est avancée par la lumière.

Nous avons exploré les mécanismes moléculaires de ces réactions en dosant les ARN messagers des protéines TIM en fonction du moment de la journée : leur synthèse est maximale vers 20 heures et minimale entre six et huit heures du matin. La transcription d'ARN messenger d'une mouche déplacée d'un incubateur à 20 heures vers un incubateur à 17 heures est maximale : ainsi, les protéines qui ne sont pas synthétisées après l'exposition à la lumière dans le second incubateur sont remplacées après le coucher du soleil.

24 heures de la vie d'un organisme

A une heure...

- Le travail de l'accouchement commence souvent.
- La quantité de globules blancs nommés lymphocytes *T* auxiliaires est maximale.

A deux heures...

- La quantité d'hormone de croissance est très élevée.

A quatre heures...

- Les crises d'asthme sont les plus fréquentes.

A six heures...

- Les règles commencent souvent.
- La quantité d'insuline dans le sang est minimale.
- La pression sanguine et le rythme cardiaque augmentent.
- La quantité de cortisol (l'hormone du stress) augmente.
- La quantité de mélatonine diminue.

A sept heures...

- Les symptômes du rhume des foins sont les plus marqués.

A huit heures...

- Le risque d'infarctus et d'attaque cardiaque est maximal.
- La sensibilité aux douleurs de l'arthrite rhumatoïde est accrue.
- La quantité de lymphocytes *T* auxiliaires est minimale.

A midi...

- La quantité d'hémoglobine dans le sang est maximale.

A 15 heures...

- La cadence respiratoire est maximale.

A 16 heures...

- La température corporelle, le rythme cardiaque et la pression sanguine sont au maximum.

A 18 heures...

- Le débit urinaire est maximal.

A 21 heures...

- Le seuil de la douleur est minimal.

A 23 heures...

- Les manifestations allergiques sont probables.

En revanche, une mouche qui passe instantanément de quatre heures à sept heures du matin n'a que peu d'ARN messagers *tim* : le lever de soleil précoce élimine la protéine TIM ; le cycle circadien suivant est anticipé.

Des mouches, des souris et des hommes

L'ensemble de ce travail portait sur des mouches, mais des mécanismes analogues avaient-ils lieu chez les mammifères et, notamment, chez

les êtres humains? En 1997, les équipes de Hajime Tei, à l'Université de Tokyo, de Hitoshi Okamura, à l'Université de Kobe, et, indépendamment, celle de Cheng Chi Lee, au Collège de médecine Baylor, ont isolé les analogues du gène *per* chez la souris et chez l'espèce humaine. Puis, en 1998, on trouvait des analogues des gènes *tim*. Présents dans toutes les cellules de l'organisme, ces gènes s'exprimaient dans le noyau supra-chiasmatique. Comment ces gènes sont-ils activés?

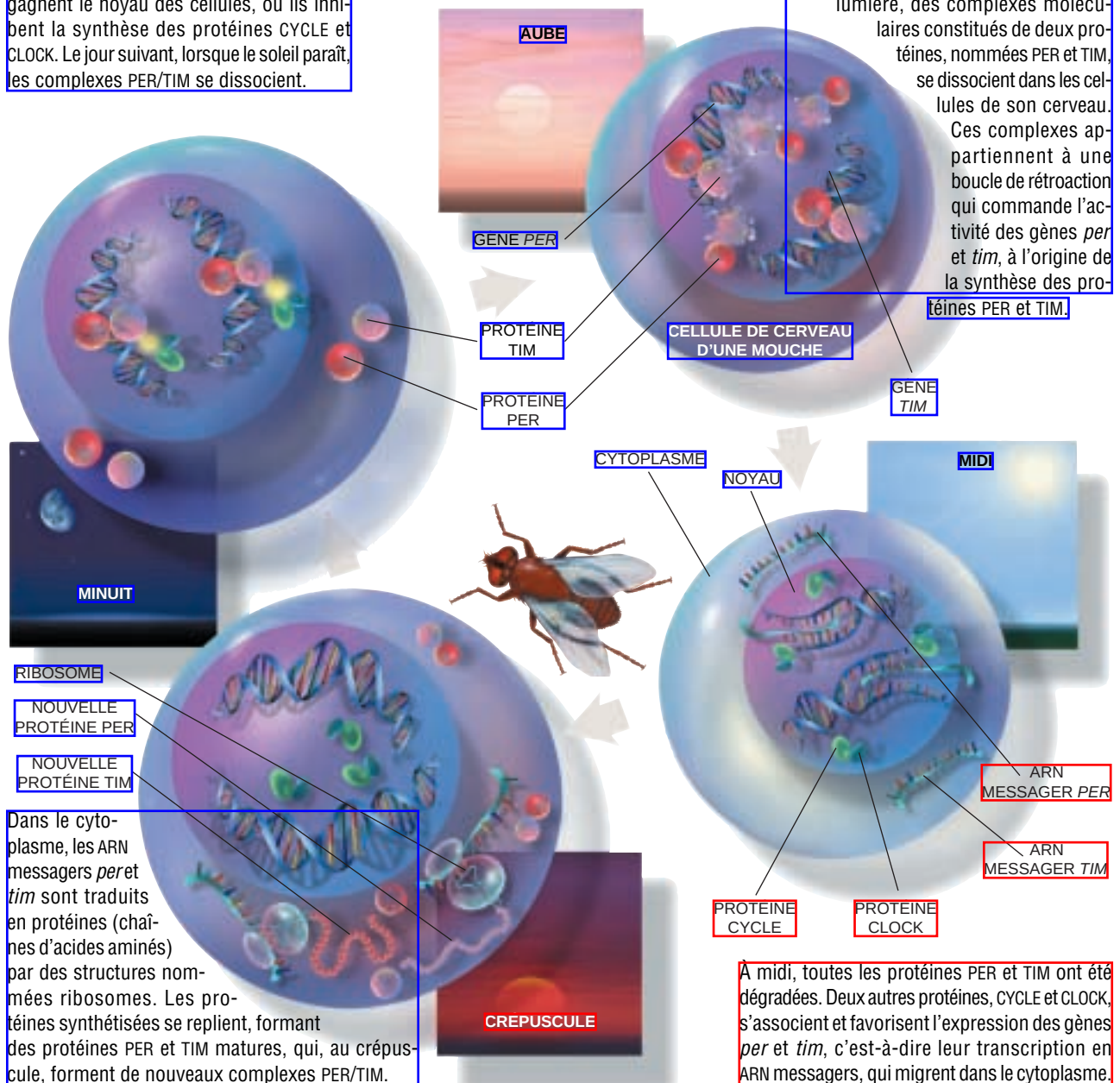
En 1997, Joseph Takahashi et ses collègues de l'Institut médical Howard Hughes ont isolé du génome de souris un gène, nommé *clock* («horloge» en anglais) qui, lorsqu'il est muté, supprime le rythme circadien des souris. Ce gène code un facteur de transcription, c'est-à-dire une protéine qui se lie à l'ADN et lui permet d'être transcrit en ARN messager.

Peu après, une version du gène *clock* a été isolée chez la drosophile. En introduisant des combinaisons des gènes *per*, *tim* et *clock* dans des cellules

L'horloge biologique d'une drosophile

Pendant la nuit, les complexes PER/TIM gagnent le noyau des cellules, où ils inhibent la synthèse des protéines CYCLE et CLOCK. Le jour suivant, lorsque le soleil paraît, les complexes PER/TIM se dissocient.

Quand une mouche est exposée à la lumière, des complexes moléculaires constitués de deux protéines, nommées PER et TIM, se dissocient dans les cellules de son cerveau. Ces complexes appartiennent à une boucle de rétroaction qui commande l'activité des gènes *per* et *tim*, à l'origine de la synthèse des protéines PER et TIM.



Des horloges de plus en plus complexes

Plusieurs découvertes ont récemment précisé les mécanismes génétiques de l'horloge biologique. D'une part, le gène est subdivisé en gène *per1*, *per2*, *per3*. D'autre part, l'équipe de Norio Ishida, de l'Institut Tsukuba, a montré que le gène *per2* est exprimé dans les tissus périphériques tel le foie, les poumons, les reins... avec un rythme différent selon les tissus. Cependant, les expressions des trois gènes sont commandées par le noyau suprachiasmatique : la lésion de ce noyau entraîne la disparition de tous les rythmes, y compris ceux des tissus périphériques. Ces auteurs supposent qu'un facteur encore inconnu, transporté par le sang, assure cette dépendance.

Par ailleurs, Gijsbertus Van der Horst, de l'Université de Rotterdam, a montré que deux protéines, nommées *cry1* et *cry2*, de la famille des cryptochromes, des pigments bleus, sont synthétisées dans certaines cel-

lules de la rétine, et jouent un rôle important dans la régulation de l'horloge biologique (voir *Pour la Science*, juillet 1999).

De surcroît, selon Manuel Field, de l'Université de Cambridge, à l'inverse de ce que l'on a cru lors de la découverte des gènes *per*, les mécanismes de régulation de l'horloge biologique de la drosophile sont différents de ceux des mammifères.

Enfin, la mélatonine est synthétisée uniquement la nuit, aussi bien chez les espèces diurnes que nocturnes : elle n'est donc pas une hormone du sommeil. Pour certains neurobiologistes, elle serait plutôt un signal d'information sur le moment du jour ou de la nuit. Toutefois, de nombreuses lignées de souris n'ont pas de mélatonine et suivent pourtant des rythmes jour / nuit très prononcés. Les rôles de la mélatonine restent donc encore à définir.

Jean-Louis VALATX,
Unité INSERM U480, Lyon.

de mammifères et de mouches, les généticiens ont montré que la protéine CLOCK se fixe sur le gène *per* de souris et sur les gènes *per* et *tim* des mouches.

Ainsi, chez les mouches, dont les horloges sont les mieux comprises, la protéine CLOCK s'associe à une protéine codée par un gène nommé *cycle*, et elle active les gènes *per* et *tim* quand les protéines PER et TIM sont absentes du noyau. Ces quatre gènes et leurs protéines constituent le cœur de l'horloge biologique des mouches ; avec quelques modifications, ce système gouverne également les rythmes circadiens de la plupart des animaux.

Depuis peu, Steve Reppert et ses collègues de l'Université Harvard explorent les signaux spécifiques qui relient les horloges biologiques de la souris et de divers comportements

modulés par ces horloges. Certains gènes semblent être activés par la protéine CLOCK, alors que les protéines PER et TIM inhibent cette fixation pendant la boucle de rétroaction : ils instaurent ainsi un cycle d'activité génétique.

Nous espérons découvrir d'autres gènes commandés par cette horloge dans des organismes telles les drosophiles et les souris. Nous découvrirons alors sans doute des protéines, dont les gènes n'ont pas encore été identifiés, qui agissent sur le comportement. L'une d'elles, ou bien un composant de l'horloge moléculaire elle-même, deviendra peut-être une cible pour des médicaments destinés à soulager le décalage horaire, les effets secondaires du travail en horaires décalés ou, encore, des troubles du sommeil et des dépressions qui y sont associées.

Michael YOUNG est professeur de génétique et directeur de laboratoire à l'Université Rockefeller.

Michael W. YOUNG, *The Molecular Control of Circadian Behavioral Rhythms and Their Entrainment in Drosophila*, in *Annual Review of Biochemistry*, vol. 67,

pp. 135-152, 1998.

Jay C. DUNLAP, *Molecular Bases for Circadian Clocks*, in *Cell*, vol. 96, n° 2, pp. 271-290, 22 janvier 1999.

J. WEINER, *Time, Love, Memory : A Great Biologist and His Quest for the Origins of Behavior*, Alfred Knopf, 1999.

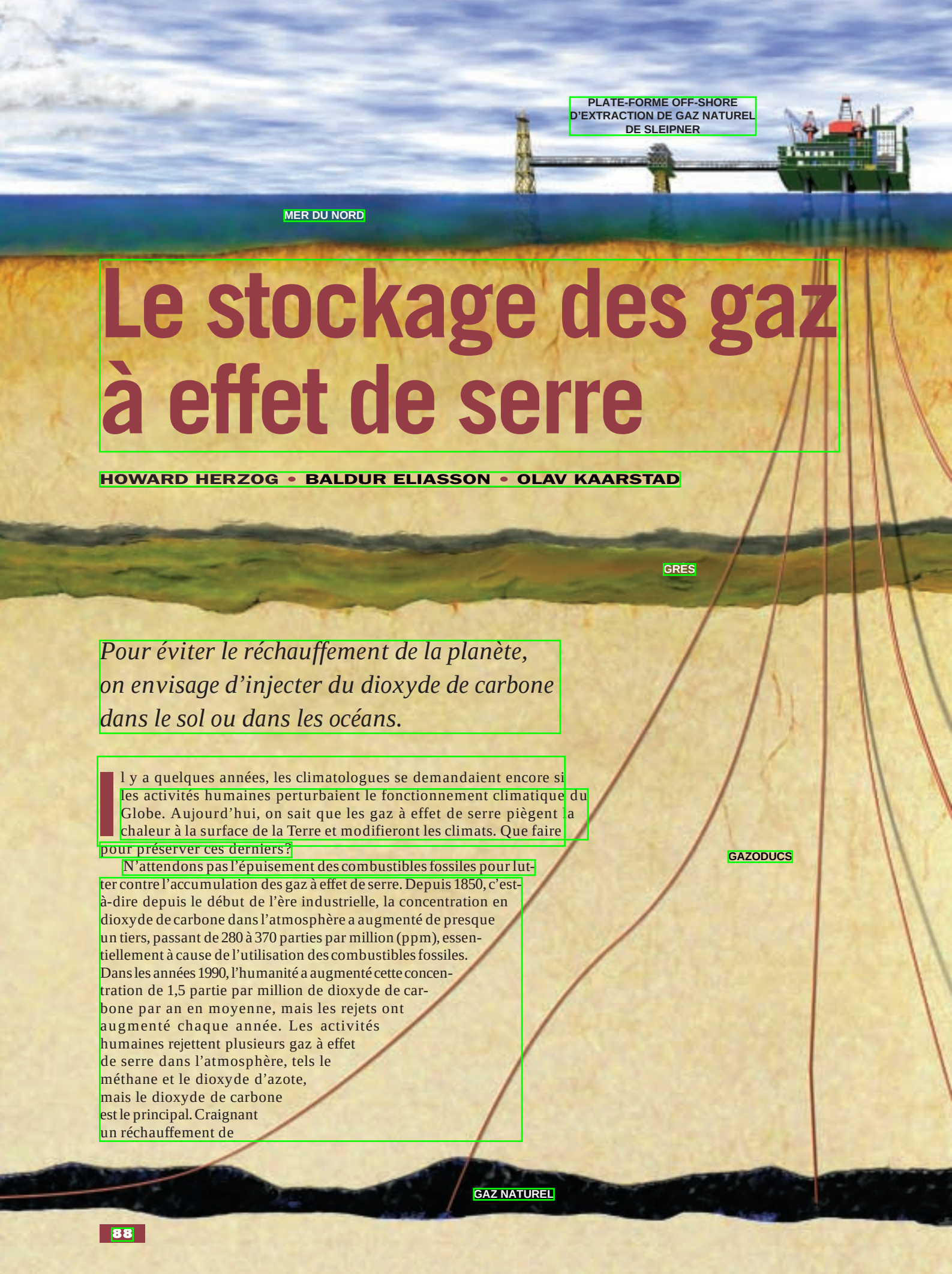


PLATE-FORME OFF-SHORE
D'EXTRACTION DE GAZ NATUREL
DE SLEIPNER

MER DU NORD

Le stockage des gaz à effet de serre

HOWARD HERZOG • BALDUR ELIASSON • OLAV KAARSTAD

GRES

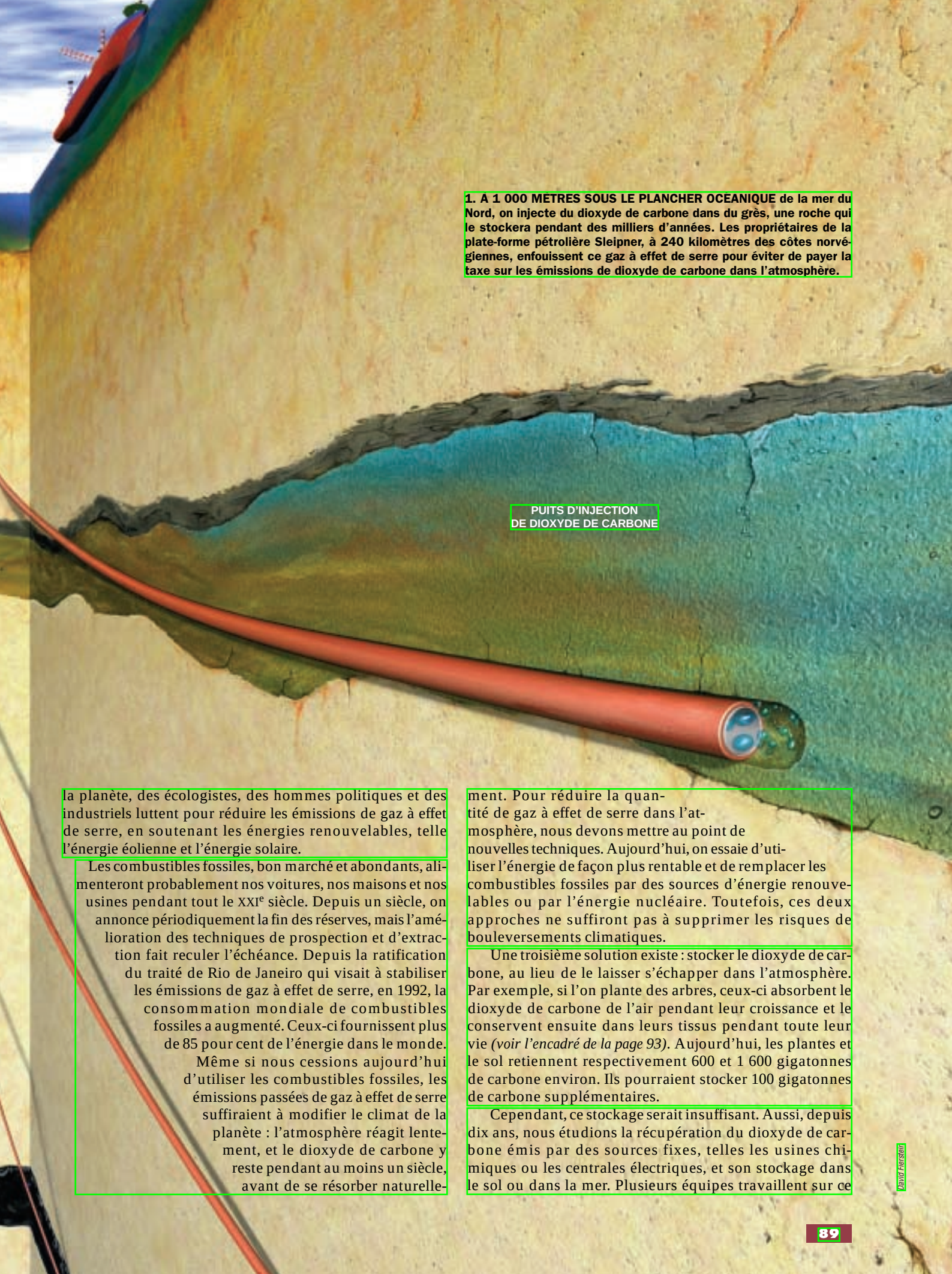
Pour éviter le réchauffement de la planète, on envisage d'injecter du dioxyde de carbone dans le sol ou dans les océans.

Il y a quelques années, les climatologues se demandaient encore si les activités humaines perturbaient le fonctionnement climatique du Globe. Aujourd'hui, on sait que les gaz à effet de serre piègent la chaleur à la surface de la Terre et modifieront les climats. Que faire pour préserver ces derniers ?

N'attendons pas l'épuisement des combustibles fossiles pour lutter contre l'accumulation des gaz à effet de serre. Depuis 1850, c'est-à-dire depuis le début de l'ère industrielle, la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère a augmenté de presque un tiers, passant de 280 à 370 parties par million (ppm), essentiellement à cause de l'utilisation des combustibles fossiles. Dans les années 1990, l'humanité a augmenté cette concentration de 1,5 partie par million de dioxyde de carbone par an en moyenne, mais les rejets ont augmenté chaque année. Les activités humaines rejettent plusieurs gaz à effet de serre dans l'atmosphère, tels le méthane et le dioxyde d'azote, mais le dioxyde de carbone est le principal. Craignant un réchauffement de

GAZODUCS

GAZ NATUREL



1. A 1 000 METRES SOUS LE PLANCHER OCEANIQUE de la mer du Nord, on injecte du dioxyde de carbone dans du grès, une roche qui le stockera pendant des milliers d'années. Les propriétaires de la plate-forme pétrolière Sleipner, à 240 kilomètres des côtes norvégiennes, enfouissent ce gaz à effet de serre pour éviter de payer la taxe sur les émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

**PUITS D'INJECTION
DE DIOXYDE DE CARBONE**

la planète, des écologistes, des hommes politiques et des industriels luttent pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, en soutenant les énergies renouvelables, telle l'énergie éolienne et l'énergie solaire.

Les combustibles fossiles, bon marché et abondants, alimenteront probablement nos voitures, nos maisons et nos usines pendant tout le XXI^e siècle. Depuis un siècle, on annonce périodiquement la fin des réserves, mais l'amélioration des techniques de prospection et d'extraction fait reculer l'échéance. Depuis la ratification du traité de Rio de Janeiro qui visait à stabiliser les émissions de gaz à effet de serre, en 1992, la consommation mondiale de combustibles fossiles a augmenté. Ceux-ci fournissent plus de 85 pour cent de l'énergie dans le monde.

Même si nous cessions aujourd'hui d'utiliser les combustibles fossiles, les émissions passées de gaz à effet de serre suffiraient à modifier le climat de la planète : l'atmosphère réagit lentement, et le dioxyde de carbone y reste pendant au moins un siècle, avant de se résorber naturelle-

ment. Pour réduire la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, nous devons mettre au point de nouvelles techniques. Aujourd'hui, on essaie d'utiliser l'énergie de façon plus rentable et de remplacer les combustibles fossiles par des sources d'énergie renouvelables ou par l'énergie nucléaire. Toutefois, ces deux approches ne suffiront pas à supprimer les risques de bouleversements climatiques.

Une troisième solution existe : stocker le dioxyde de carbone, au lieu de le laisser s'échapper dans l'atmosphère. Par exemple, si l'on plante des arbres, ceux-ci absorbent le dioxyde de carbone de l'air pendant leur croissance et le conservent ensuite dans leurs tissus pendant toute leur vie (voir l'encadré de la page 93). Aujourd'hui, les plantes et le sol retiennent respectivement 600 et 1 600 gigatonnes de carbone environ. Ils pourraient stocker 100 gigatonnes de carbone supplémentaires.

Cependant, ce stockage serait insuffisant. Aussi, depuis dix ans, nous étudions la récupération du dioxyde de carbone émis par des sources fixes, telles les usines chimiques ou les centrales électriques, et son stockage dans le sol ou dans la mer. Plusieurs équipes travaillent sur ce

sujet, dans le cadre du programme de recherche sur les gaz à effet de serre de l'Agence internationale de l'énergie et dans le cadres de programmes nationaux et industriels.

Une nouvelle approche en Norvège

La première opération de stockage de dioxyde de carbone dans une formation géologique a commencé en octobre 1996, en mer du Nord, à 240 kilomètres des côtes norvégiennes. Sur l'une des plates-formes pétrolières du site de Sleipner, on injecte chaque semaine 20 000 tonnes de dioxyde de carbone dans les pores d'une couche de grès, à 1 000 mètres sous le fond de la mer.

Comment cette opération a-t-elle commencé? Le gaz naturel extrait sur cette plate-forme contient neuf pour

cent de dioxyde de carbone : pour qu'il soit vendable, l'usine chimique de la plate-forme le purifie, mais, au lieu de rejeter le dioxyde de carbone dans l'atmosphère, les sociétés exploitantes (*Statoil, Exxon, Norsk Hydro et Elf*) ont décidé de le stocker. Elles le compriment, puis l'injectent à travers un puits de 200 mètres de profondeur, dans la couche de grès sous-jacente initialement remplie d'eau salée (formation aquifère saline). La quantité de gaz ainsi stocké cette année à Sleipner (un million de tonnes) représente trois pour cent des émissions totales de dioxyde de carbone de la Norvège.

Dans ce pays, c'est une taxe sur les émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère qui a décidé les pétroliers à stocker ce gaz : en 1996, cette taxe s'élevait à environ 300 francs par tonne de gaz émis (aujourd'hui, elle n'est plus

que de 230 francs environ). L'investissement correspondant à l'achat du matériel de compression et au forage du puits s'est élevé à 480 millions de francs environ. Le rejet du dioxyde de carbone dans l'atmosphère aurait coûté environ 300 millions de francs par an entre 1996 et 1999 : les propriétaires de la plate-forme ont donc amorti leur investissement en un an et demi.

Dans d'autres régions du monde, des pétroliers ont des projets similaires. En mer de Chine, le champ pétrolier de Natuna contient du gaz naturel et 71 pour cent de dioxyde de carbone : l'exploitant prévoit de stocker ce dernier. Aujourd'hui, on étudie les possibilités de stockage de ce gaz dans le sous-sol, notamment sous les installations de gaz naturel liquéfié des sites de Gordon (Australie), de Snøhvit (Norvège) et sous les champs pétroliers de la Pente (Alaska).

Les pétroliers doivent séparer le gaz naturel du dioxyde de carbone pour le vendre ; le dioxyde de carbone est donc prêt pour le stockage. Toutefois, dans d'autres industries, sa récupération représente une étape coûteuse à mettre en place avant le stockage. Les industriels concernés seront plus difficiles à convaincre que les pétroliers, à cause du coût supplémentaire.

L'enfouissement du dioxyde de carbone : quelle technique employer?

• En quoi consiste le stockage du carbone?

Au lieu de laisser le dioxyde de carbone (un gaz à effet de serre) produit par les activités humaines se dégager dans l'atmosphère, on envisage de le stocker dans des réservoirs naturels, afin de limiter les risques de réchauffement de l'atmosphère. La plantation d'arbres est l'un des moyens de stockage. Nous en étudions un autre : la récupération du dioxyde de carbone dégagé par des sources fixes, par exemple par les centrales électriques, et son injection dans l'océan ou dans le sol.

• Où sera stocké le dioxyde de carbone?

Dans des formations géologiques, tels les gisements houillers non exploitables, les puits de pétrole ou de gaz naturel épuisés et les formations géologiques qui contiennent de l'eau salée. Le procédé employé serait le pompage, comme pour l'extraction du pétrole, mais en sens inverse (vers le bas). On étudie aussi les possibilités de stockage dans la mer, en répandant le dioxyde de carbone en petites gouttelettes, de sorte que sa concentration reste faible et modifie peu les écosystèmes environnants, et en choisissant une profondeur telle que le gaz reste dans la mer.

• Comment évaluer les risques que présente ce stockage?

L'évaluation des risques est l'un des principaux objectifs des recherches. En 1986, l'énorme bulle de dioxyde de carbone qui s'est dégagée du lac Nyos (au Cameroun), asphyxiant près de 2 000 personnes, a posé le problème de la sécurité de façon dramatique. Toutefois, la situation dans le lac Nyos était totalement différente de celle que nous envisageons dans la mer. L'éruption y était inéluctable, étant donné la petite taille du lac et la grande quantité de dioxyde de carbone stocké. En revanche, la capacité de l'océan est bien supérieure. Dans le cas d'un stockage souterrain, la nature a fait ses preuves : des réservoirs naturels, tel celui du McElmo Dome (Colorado), retiennent d'énormes quantités de dioxyde de carbone depuis des siècles.

• Le stockage du dioxyde de carbone a-t-il déjà commencé?

Oui. La plate-forme *off-shore* de gaz naturel de Sleipner, au large de la Norvège, injecte chaque jour du dioxyde de carbone dans un aquifère salin à 1 000 mètres sous le plancher océanique. C'est le seul projet qui vise à réduire les risques de réchauffement de l'atmosphère, mais d'autres projets démontrent la faisabilité d'un tel stockage. Plus d'une dizaine de centrales électriques collectent le dioxyde de carbone de leurs rejets gazeux, notamment la centrale de Shady Point (Oklahoma), qui le revend. Aux États-Unis, dans plus de 65 puits d'extraction de pétrole, on injecte du dioxyde de carbone sous terre pour augmenter le rendement du forage.

En sous-sol

La technique d'injection du dioxyde de carbone dans le sous-sol est au point : c'est la même que pour extraire du pétrole ou du gaz naturel, mais on pompe vers le bas. On l'utilise même sur de nombreux champs de pétrole pour rendre les puits d'extraction plus productifs : en injectant du dioxyde de carbone dans le pétrole, on fait remonter ce dernier jusqu'à la surface.

Les formations géologiques du monde entier, telles les formations aquifères salines (site de Sleipner), les gisements houillers non exploitables, les réservoirs de pétrole et de gaz épuisés, les cavernes rocheuses et les dômes de sel, pourraient contenir des centaines, voire des milliers, de gigatonnes de carbone.

Bien que les formations géologiques soient de bons sites de stockage, le réservoir potentiel le plus important est l'océan, qui contient 40 000 gigatonnes de carbone dissous (l'atmosphère n'en contient que 750) et dont la capacité est bien supérieure. Même si l'on injectait dans les

océans le double de la quantité de dioxyde de carbone présente dans l'atmosphère en 1850, la concentration de ce composé augmenterait de moins de deux pour cent. Pendant les siècles prochains, 85 pour cent des émissions actuelles se dissoudront naturellement. Pour préserver le climat, nous proposons d'accélérer le processus.

Pour un stockage efficace, on devrait injecter le dioxyde de carbone sous la thermocline, une couche d'eau dont la profondeur varie de 100 à 1 000 mètre et où la température diminue rapidement avec la profondeur. L'eau qui se trouve sous la thermocline, plus froide et plus dense que l'eau de surface, remonte très lentement. Elle met des siècles à se mélanger avec elle. En général, plus le dioxyde de carbone est injecté profondément, plus il devrait mettre de temps à atteindre l'atmosphère. On injecterait le gaz soit à des profondeurs de 1 000 à 2 000 mètres, afin de former une solution diluée, soit à plus de 3 000 mètres, afin de créer un «lac» de dioxyde de carbone. La première méthode préserve davantage l'environnement local que la seconde, qui permet un stockage plus long.

ronnement local que la seconde, qui permet un stockage plus long.

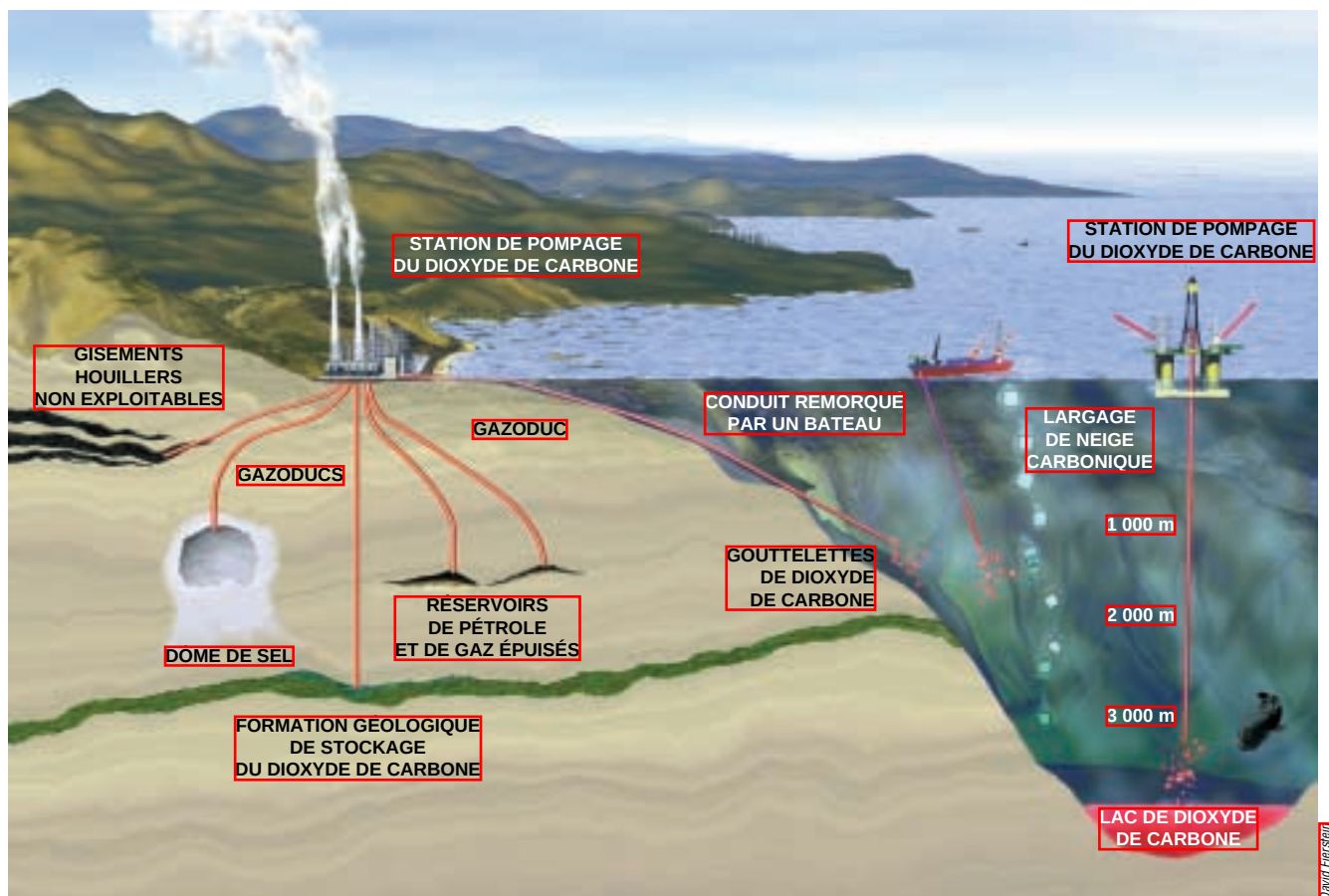
L'idée du stockage dans les océans a été proposée pour la première fois en 1977 par Cesare Marchetti, de l'Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués de Laxenburg (Autriche). C. Marchetti proposa que des pipelines acheminent le dioxyde de carbone jusqu'à Gibraltar, pour qu'il s'écoule ensuite naturellement vers les eaux profondes de l'océan Atlantique. D'autres solutions ont ensuite été proposées : le largage de neige carbonique dans l'océan, à partir de bateaux, ou l'injection du dioxyde de carbone, soit à 1 000 mètres de profondeur à travers un conduit remorqué par un bateau, soit plus profond (4 000 mètres et plus), par un tuyau qui descendrait dans les dépressions du plancher océanique.

Sécurité et respect de l'environnement

Quelles seront les conséquences sur l'environnement du stockage du dioxyde de carbone dans le sol ou dans la mer ? Le stockage est-il préférable à

l'émission dans l'atmosphère ? Dans le cas du stockage souterrain, on doit évaluer la stabilité des formations géologiques qui serviraient de réservoirs, afin que le gaz ne retourne pas progressivement dans l'atmosphère : la libération soudaine et massive de dioxyde de carbone dans l'air formerait une couche de ce gaz, plus lourde que l'air, qui asphyxierait les êtres vivants. Toutefois, les réservoirs naturels de dioxyde de carbone dans le sol, tel celui de McElmo Dome (Colorado), vieux de plusieurs millions d'années, montrent que le stockage du carbone est réalisable dans de bonnes conditions de sécurité.

En revanche, le stockage océanique pose le problème de l'acidité de l'océan. Le pH de l'eau de mer au voisinage d'un site d'injection serait compris entre 5 et 7 (l'eau serait acide), alors qu'il est normalement de 8 (l'eau de mer est basique). Cette modification importante de l'acidité risquerait de nuire au zooplancton, aux bactéries et aux animaux des fonds sous-marins, incapables de se déplacer vers des eaux moins acides. Avec notre collègue Eric



2. LE STOCKAGE DU DIOXYDE DE CARBONE sous terre ou dans la mer éliminerait l'émission des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Pour chaque site envisagé, on étudie le coût du stockage, les risques qu'il présente et ses éventuels effets sur l'environnement.

Des mesures politiques pour protéger le climat

par David Keith et Edward Parson

En 200 ans, les activités humaines ont augmenté de 35 pour cent la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Cette augmentation modifiera les climats. De combien ? Quand ? Comment ? Quelles en seront les conséquences écologiques, économiques et sociales ? Nous n'avons pas de réponses précises à ces questions, mais l'ensemble des États conviennent qu'on doit aujourd'hui réduire les émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Pour stabiliser la concentration de ce gaz à 550 parties par million, soit deux fois sa concentration préindustrielle, on devrait réduire les émissions de moitié, par rapport aux prévisions pour 2050. C'est un objectif ambitieux qui ne sera atteint que, dans le meilleur des cas, grâce à la réorganisation complète des systèmes mondiaux de production d'énergie.

Comment réduire les émissions de gaz à effet de serre ? En

augmentant les rendements énergétiques ? En utilisant d'autres sources d'énergie (solaire, éolienne, de la biomasse, nucléaire) ? Howard Herzog, Baldur Eliasson et Olav Kaarstad proposent une autre solution : continuer à brûler des combustibles fossiles, mais sans rejeter de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, c'est-à-dire en le stockant dans le sol ou dans la mer.

Même si l'objectif des 550 parties par million est atteint, cette concentration provoquera des changements climatiques. Les problèmes d'environnement qui en découleront n'auront probablement que des conséquences limitées sur l'économie mondiale. En particulier, les pays riches seront peu affectés. En revanche, à l'échelle régionale, les effets seront plus marqués : certaines régions en tireront profit, alors que d'autres en souffriront. Par exemple, aux États-Unis, le Nord du pays pourrait connaître des hivers plus doux, mais des écosystèmes continentaux entiers pourraient disparaître, telles les forêts des montagnes du Sud-Ouest, les forêts du littoral et les prairies alpines. En outre, la menace de changements climatiques imprévus, ajoutés aux risques précédents, incite fortement à stabiliser la concentration de dioxyde de carbone.

Aujourd'hui, le coût de la réduction des émissions ou les problèmes que pose cette réduction. Les autres sources d'énergie restent chères. Quant aux énergies renouvelables, elles ont une faible densité d'énergie : elles sont peu rentables par rapport à la surface de terrain nécessaire à leur mise en œuvre, ce qui limiterait les possibilités d'utilisation à grande échelle. Leur coût diminuerait probablement grâce aux progrès techniques, mais leur densité énergétique est une caractéristique intrinsèque immuable.

La réduction des émissions de carbone portera-t-elle un coup à l'économie ? Pas nécessairement. Tout dépendra du temps

nécessaire à la mise au point de techniques bon marché, directement lié aux taxes qui seront instaurées sur le dioxyde de carbone émis dans l'atmosphère. Pour évaluer le coût de la réduction des émissions, les théories classiques n'ont pas pris en compte l'accélération de l'innovation technique due à d'éventuelles incitations politiques et financières. Dans cette hypothèse, en retardant la réduction des émissions, on se donne le temps de trouver des solutions techniques moins coûteuses. Toutefois, nous avons plutôt le sentiment qu'une action politique rapide pour prévenir les changements climatiques stimulerait l'innovation et abaisserait le coût de la réduction des émissions.

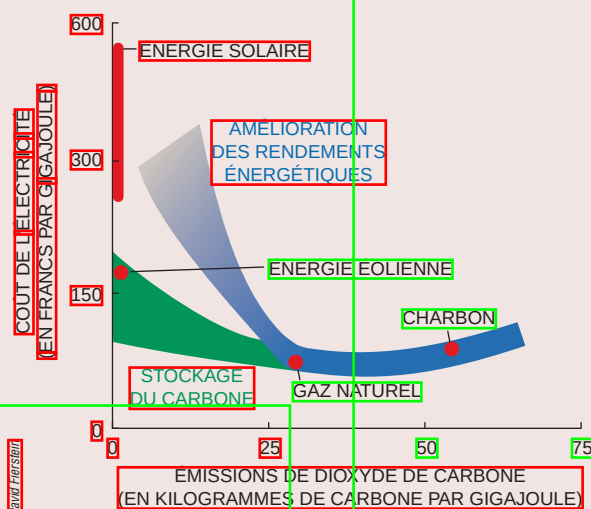
Le stockage du carbone est une des innovations attendues. Il est déjà techniquement possible et semble moins cher que l'ex-

ploitation d'énergies renouvelables. Cependant, la réduction massive des émissions passe par l'abandon de l'essence et du gasoil au profit de carburants sans carbone, tel l'hydrogène. Grâce au stockage du carbone, l'utilisation des combustibles fossiles poserait moins de problèmes d'environnement, ce qui résoudrait peut-être du même coup quelques conflits politiques : si le stockage du carbone se généralisait, l'industrie des combustibles fossiles pourrait continuer à fonctionner, avec son marché actuel, plus le nouveau marché du stockage du carbone ; elle ferait donc moins obstacle aux politiques de réduction des émissions.

Avant de stocker le carbone, on étudiera les réservoirs potentiels afin de déterminer ceux qui ne présentent pas de risque. À cause des erreurs passées dans la gestion des déchets toxiques et nucléaires, les experts en stockage du carbone n'ont pas la confiance du public. Les écologistes restent convaincus que les combustibles fossiles nuisent à la qualité de l'environnement. Ils se méfient du stockage du carbone, car il relève de la «géo-ingénierie», c'est-à-dire de l'intervention sur le climat à l'échelle planétaire, tout comme la solution qui consisterait à refroidir la planète par injection d'aérosols dans la stratosphère afin de réfléchir les rayonnements solaires.

En somme, le stockage du carbone est prometteur, mais ses conséquences incertaines imposent la prudence. Des mesures politiques et économiques sont nécessaires pour soutenir la recherche fondamentale sur l'énergie et pour inciter les sociétés à innover, afin de réduire les émissions de dioxyde de carbone à moindre coût. Le stockage de ce gaz est aujourd'hui la meilleure alternative parmi celles qui sont proposées pour les prochaines décennies.

David KEITH, Université de Carnegie Mellon
Edward PARSON, Université Harvard



Remplacer le charbon par du gaz naturel réduirait les émissions de dioxyde de carbone et les coûts. Pour diminuer encore les émissions, le stockage du carbone (en vert) serait moins cher que l'énergie solaire ou l'amélioration des rendements énergétiques (en bleu). Bien que l'énergie éolienne soit relativement bon marché, les grandes surfaces de terrain qu'elle utilise compromettent la généralisation de son utilisation.

Adams, nous avons montré qu'un facteur de dilution de dioxyde de carbone inférieure à une partie par million ne modifierait pas beaucoup le pH. La variation serait de moins de 0,1. En injectant le dioxyde de carbone dans la mer sous forme de petites gouttelettes (après l'avoir comprimé pour le liquéfier), à partir d'un conduit posé sur le plancher océanique ou remorqué par un bateau, cette concentration ne serait pas dépassée, ce qui supprimerait les problèmes d'acidité.

Au cours des prochaines années, on testera expérimentalement les conséquences sur l'environnement des différentes méthodes de stockage du dioxyde de carbone. Par exemple, en 2001, nous analyserons, avec une équipe internationale (États-Unis, Japon, Suisse, Norvège, Canada, Australie), la faisabilité technique et l'influence sur l'environnement d'un stockage de carbone dans la mer au large d'Hawaii.

Notamment, pendant deux semaines, nous réaliserons une série de tests de dissolution de dioxyde de carbone dans la mer à une profondeur de 800 mètres. Nous observerons le panache qui en résultera et mesurerons le pH de l'eau, la quantité de carbone inorganique dissous... Ainsi, nous modéliserons les conséquences du stockage du dioxyde de carbone, afin de prévoir son impact sur l'environnement avec précision. Nous déterminerons aussi la technique la mieux adaptée à la dissolution de dioxyde de carbone dans l'eau sous forme de petites gouttelettes.

Le coût du stockage du carbone

Combien le stockage du dioxyde de carbone coûtera-t-il? Comme les centrales électriques sont responsables d'un tiers des émissions mondiales de dioxyde de carbone, le stockage du carbone les concerne en premier lieu. Ces usines ont réduit leur rejet de polluants, tels les particules solides, les oxydes de soufre, d'azote et le monoxyde de carbone, mais pas le dioxyde de carbone.

Depuis 1910, des «précipitateurs électrostatiques» éliminent des particules de polluants résultant de la combustion du pétrole et du gaz naturel, sans grever le prix de l'électricité. Aujourd'hui, une centrale électrique moderne équipée pour réduire au minimum les particules, les oxydes de soufre et les oxydes

d'azote rejetés coûte environ 30 pour cent de plus (à l'installation) qu'une centrale ordinaire. Ensuite, ces équipements n'augmentent le prix du kilowattheure d'électricité que de 0,1 à 0,5 pour cent.

Les rejets des centrales électriques thermiques ne contiennent que 3 à 15 pour cent de dioxyde de carbone. Avant de stocker le carbone, on devrait d'abord concentrer le dioxyde de carbone des émissions de gaz. Avec les équipements existants, cette étape est

plus coûteuse que le stockage lui-même. Notre objectif est de mettre au point un procédé moins cher.

En général, pour séparer le dioxyde de carbone d'un mélange gazeux, on le fait réagir avec de la monoéthanolamine en solution diluée dans une tour d'absorption, à température ambiante. Puis on chauffe le composé formé à environ 120 °C dans une seconde colonne, le rectificateur; le dioxyde de carbone libéré est ensuite comprimé,

Plantons des arbres

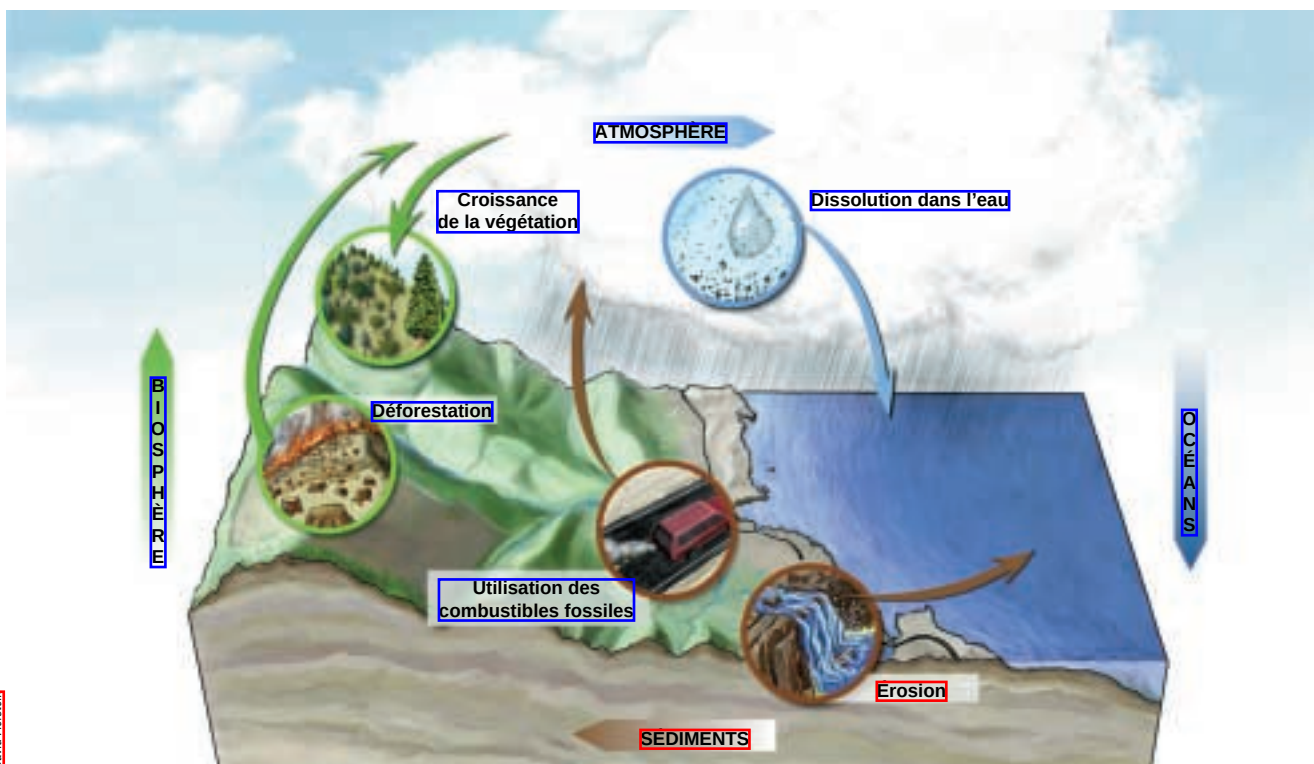
Depuis plus de dix ans, on stocke du carbone dans les régions déforestées et les terres cultivées du Guatemala, sans conduit souterrain ni station de pompage : on plante des arbres. À mesure qu'ils poussent, ils absorbent le dioxyde de carbone atmosphérique, dont ils stockent le carbone sous forme de bois. Planter des forêts est donc un moyen de stocker le carbone en profitant de ce processus naturel. La reforestation, l'afforestation (la plantation d'arbres sur des terres qui initialement ne portaient pas de forêts) et l'agrosylviculture (l'intégration d'arbres aux cultures agricoles) sont prévues par le traité international de Kyoto pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Dès 1988, la compagnie d'électricité *Allied Energy Services (AES)* utilisa la sylviculture pour compenser ses émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. À cette époque, AES prévoyait de construire une nouvelle centrale thermique dans le Connecticut; les ingénieurs avaient calculé que la combustion de charbon, pendant les 40 ans d'exploitation, rejetterait 52 millions de tonnes de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Avec l'Institut des ressources mondiales et la Coopérative pour l'assistance et le secours partout dans le monde, AES créa des forêts communautaires au Guatemala, y introduisit des pratiques d'agrosylviculture et forma des brigades de pompiers, afin de protéger les arbres nouvellement plantés et les forêts naturelles. D'après l'Institut des ressources mondiales, 58 millions de tonnes de dioxyde de carbone seront stockées d'ici la fin du projet. Aujourd'hui, plus d'une dizaine de programmes de plantations sont en cours sur quelque quatre millions d'hectares de terres boisées aux États-Unis, en Norvège, au Brésil, en Malaisie, en Russie et en Australie.

Les forêts de l'ensemble du Globe stockeraient près d'un trillion de tonnes de carbone. Pour compenser les émissions actuelles de dioxyde de carbone (près de 13 milliards de tonnes), on devrait planter chaque année de nouvelles forêts couvrant une surface équivalente à celle de l'Inde. Les projets de sylviculture, s'ils ne résolvent pas le problème des émissions de gaz à effet de serre, présentent néanmoins de nombreux avantages, allant de l'amélioration de la qualité de l'environnement à la création d'emplois dans les plantations. Cependant, la capacité de stockage de carbone est limitée. En outre, les plantations d'arbres nuisent à la biodiversité des plantes indigènes et obligent parfois à déplacer des populations. Les arbres ne peuvent enrayer seuls les risques de bouleversement climatique dus à l'émission des gaz à effet de serre. Nous devons prendre d'autres engagements, à l'échelle planétaire, afin de réduire ces émissions.



Aux îles Fidji, des ouvriers plantent des arbres dans le cadre d'un programme de reforestation.



3. EN BRULANT DES COMBUSTIBLES FOSSILES, on transfère le carbone des sédiments dans l'atmosphère. Le but du stockage du carbone est de transférer une partie du carbone atmosphérique dans la mer, les sédiments ou la biosphère.

séché, refroidi, liquéfié et purifié si nécessaire, tandis que la solution de monoéthanolamine est recyclée. Ce procédé est efficace, mais il consomme trop d'énergie pour le stockage du carbone à grande échelle. Seules quelques centrales électriques (telle celle de Shady Point, dans l'Oklahoma) l'utilisent pour récupérer le dioxyde de carbone de leurs rejets gazeux. Le dioxyde de carbone obtenu est vendu à d'autres industries, qui l'utilisent pour lyophiliser les volailles ou gazéifier la bière et les jus de fruits.

On peut aussi faire réagir le dioxyde de carbone avec l'hydrogène, afin de

former du méthanol, utilisable comme carburant. Le méthanol ainsi produit est plus cher que le méthanol obtenu à partir du gaz naturel, mais la réutilisation du dioxyde de carbone, qui lui donne une valeur marchande, devrait contribuer à réduire les émissions, inciter les industriels à mettre au point une technique de récupération de dioxyde de carbone moins chère et faciliter la transition vers l'emploi de combustibles moins polluants.

Malgré les risques de réchauffement du climat, le charbon, le pétrole et le gaz naturel restent les principales sources d'énergie. On connaît les techniques qui utilisent ces combustibles tout en préservant le climat. Aujourd'hui, la récupération et le stockage du dioxyde de carbone rejeté par les centrales électriques augmenteraient le coût de production de l'électricité de 50 à 100 pour cent. Cependant, ces équipements n'augmentent pas le prix de l'acheminement ni de la distribution de l'électricité, qui représentent une proportion importante des factures d'électricité des consommateurs. Celles-ci n'augmenteraient que de 30 à 50 pour cent, et moins si l'on trouvait des techniques de séparation plus efficaces.

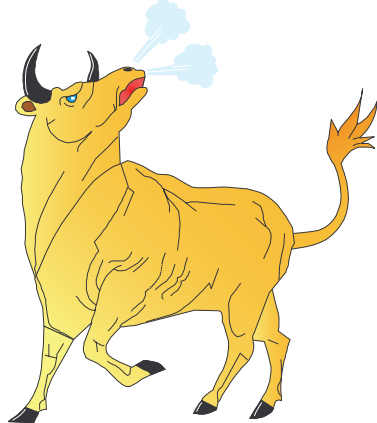
Comment généraliser le stockage du carbone? Tout d'abord, les cher-

cheurs doivent étudier la stabilité des sites envisagés. Puis les industriels, aidés par les États, doivent tester les nouveaux procédés à l'échelle industrielle et chercher des moyens de réduire les coûts (principalement les coûts de séparation du dioxyde de carbone des autres gaz rejetés dans les centrales électriques). Le projet Sleipner a montré que le stockage du carbone réduit efficacement les émissions de dioxyde de carbone lorsqu'il existe une incitation économique. Au cours des 100 dernières années, les systèmes de production d'énergie ont profondément changé : nous sommes passés d'une économie stationnaire, fondée sur le charbon et la vapeur, à une économie mobile fondée sur les combustibles liquides, le gaz et l'électricité. Dans les 100 prochaines années, les changements devraient être aussi profonds.

Howard HERZOG travaille au laboratoire d'énergie de l'Institut de technologie du Massachusetts. Baldur ELIASSON est directeur du programme énergétique de la Société ABB. Olav KAARSTAD est conseiller pour l'orientation de la recherche sur l'énergie et l'environnement dans la Société norvégienne Statoil.



4. L'INSTALLATION DE SHADY POINT, dans l'Oklahoma, sépare le dioxyde de carbone du mélange gazeux rejeté dans l'atmosphère et le vend à des industries alimentaires.



Le troupeau du soleil

IAN STEWART

Archimède a énoncé un problème qu'il était incapable de résoudre.

En 1917, le mathématicien britannique Henry Dudeney décrit un curieux problème inspiré de la bataille de Hastings, lors de laquelle les Normands de Guillaume le Conquérant (1027-1087) ont battu les Saxons du roi Harold (1022-1066), le 14 octobre 1066. Selon Dudeney, une ancienne chronique de la bataille précise que «les hommes d'Harold étaient très groupés et formaient 61 carrés identiques. Lorsque Harold rejoignait ses troupes, les Saxons s'organisaient en un nouveau et puissant carré». Quelle est la plus petite valeur du nombre de Saxons pour laquelle ces formations sont possibles ?

En termes mathématiques, il s'agit de trouver le plus petit carré, tel que son produit par 61 augmenté de 1 soit encore un carré. Nous cherchons donc les solutions en nombres entiers de l'équation $y^2 = 61x^2 + 1$, qui est un exemple d'équation de Pell (ainsi nommée à tort d'après un obscur mathématicien du XVII^e siècle dont les contributions à cette question n'ont pas été originales). Les équations de ce type, où 61 peut être remplacé par un entier positif non carré, ont une infinité de solutions que l'on détermine par la méthode des fractions continues (des fractions telles que $a + 1/(b + 1/(c + 1/...))$).

Afin de nous échauffer, changeons de bataille et considérons celle, moins

connue, de Brighton, où les soldats du roi Harold formaient cette fois 11 carrés, le reste du problème étant inchangé (voir la figure 1). On résout l'équation correspondante ($y^2 = 11x^2 + 1$) par tâtonnements : la plus petite solution est $x = 3$ et $y = 10$.

Cette méthode ne permet pas de résoudre le problème de Dudeney (sauf si l'on utilise un ordinateur), car la plus petite solution est $x = 226\ 153\ 980$ et $y = 1\ 766\ 319\ 049$. Les solutions de l'équation de Pell $y^2 = Dx^2 + 1$ varient beaucoup selon le coefficient D . Pour certaines valeurs de D (29, 46, 53, 58, 61, 67, 73, 76, 85, 86, 89, 93, 94 et 97), la plus petite solution est supérieure à 1 000, et les tâtonnements sont impossibles. Parmi ces valeurs, la plus difficile, et de beaucoup, est 61 : le choix de Dudeney est judicieux ! Avec quelques efforts, vous résoudrez les équations pour D égal à 60 ou à 62 (les réponses sont données à la fin de l'article).

Toutefois, Dudeney aurait pu compliquer encore son problème en choisissant $D = 1\ 597$: la plus petite solution est approximativement $x = 1,3 \cdot 10^{46}$ et $y = 5,2 \cdot 10^{47}$. Et pour $D = 9\ 781$, le problème est pire encore !

L'équation de Pell se retrouve dans le célèbre problème du troupeau du soleil. En 1773, le dramaturge allemand Gotthold Lessing (1729-1781) a découvert

un manuscrit où une énigme est exprimée en vers : 22 couplets élégiaques que l'auteur présumé, le mathématicien grec Archimède (-287/-212), aurait envoyé en 250 avant notre ère à Ératosthène de Cyrène (-284/-192), le bibliothécaire en chef de la bibliothèque d'Alexandrie. Le poème commence ainsi : «Si tu es appliqué et sage, ô étranger, calcule le nombre de têtes du troupeau du soleil qui, il y a bien longtemps, paissaient dans les prairies de la trinacrienne île de Sicile.» La Trinacrie, qui signifie à trois caps rocheux, est l'ancien nom de la Sicile.

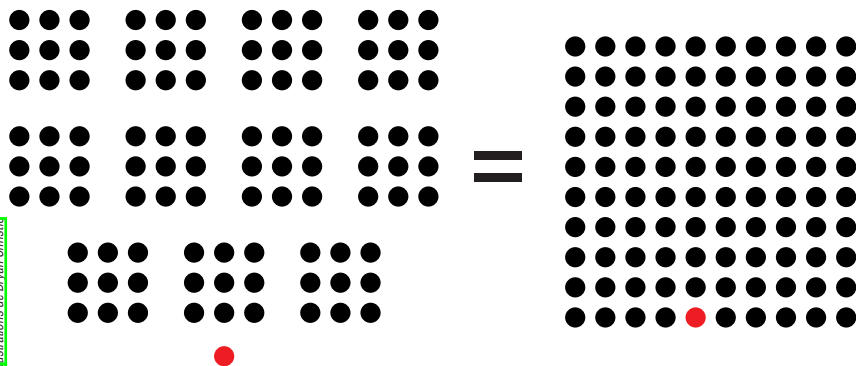
Selon l'Odyssée d'Homère, les bovins du soleil étaient 350. Toutefois, Archimède pensait à un nombre bien supérieur : son énoncé stipule que le troupeau est composé de taureaux blancs (B), noirs (N), jaunes (J), tachetés (T) et de vaches de variétés équivalentes (b, n, j, t). Les nombres de chaque type de bovins remplissent sept conditions «faciles» à satisfaire et deux «difficiles» : les premières s'expriment par un système à sept équations et huit variables (voir la figure 2).

La première condition difficile indique que $B + N$, le nombre total de taureaux blancs et noirs, est un carré parfait ; la seconde, que $J + T$, les taureaux jaunes et tachetés, est un nombre triangulaire, c'est-à-dire de la forme $1 + 2 + 3 + \dots + m$, où m est un entier positif.

Des sept premières conditions, on déduit que les huit inconnues sont les multiples déterminés d'un même entier positif k :

$B = 10\ 366\ 482k$
 $N = 7\ 460\ 514k$
 $J = 4\ 149\ 387k$
 $T = 7\ 358\ 060k$
 $b = 7\ 206\ 360k$
 $n = 4\ 893\ 246k$
 $j = 5\ 439\ 213k$
 $t = 3\ 515\ 820k$.

Quelle est la plus petite valeur de k qui satisfait les deux conditions difficiles ? En 1830, le mathématicien allemand J. Wurm a résolu une version simplifiée de l'énigme, où il ne conserve pas la condition que « $B + N$ soit un carré». De la condition qui impose un nombre $J + T$ triangulaire, on déduit que $92\ 059\ 576k + 1$



1. Une armée de 99 hommes (points noirs), telle celle du roi Harold, peut être disposée en onze carrés de neuf hommes sans le roi, et en un grand carré de dix hommes de côté lorsque le roi se joint à ses soldats. Les nombres $x = 3$ et $y = 10$ sont la plus petite solution de l'équation $y^2 = 11x^2 + 1$.

est un carré : avec la plus petite valeur de k adéquate, le troupeau du soleil contient 5 916 837 175 686 animaux.

Cependant, l'équation de Wurm a une infinité de solutions. On peut alors chercher, parmi elles, la plus petite, telle que $B + N$ soit un carré. En 1880, un autre mathématicien allemand, A. Amthor, a prouvé que k est égal à $4\,456\,749p^2$, p satisfaisant l'équation de Pell selon laquelle $410\,286\,423\,278\,424p^2 + 1$ est un carré. La méthode des fractions continues permet de calculer la plus petite valeur de p . Amthor n'est pas venu à bout des calculs, mais il a montré que le nombre total de bovins est un nombre de 206 545 chiffres, dont il a déterminé les quatre premiers.

Entre 1889 et 1893, le club de mathématiques d'Hillsboro a calculé les 32 premiers chiffres, dont deux étaient faux. Enfin, en 1965, la première solution complète a été calculée par des mathématiciens de l'Université de Waterloo. En 1981, Harry Nelson a publié les 206 545 chiffres qu'un superordinateur CRAY-1 a calculé en dix minutes.

Bien que la solution ait été trouvée, le problème du troupeau du soleil a continué d'intriguer les mathématiciens, qui disposent aujourd'hui d'ordinateurs très rapides capables de calculer avec des milliers de décimales. Grâce au logiciel *Mathematica*, Ilan Vardi, du Collège occidental, a refait toute l'analyse qui précède en quelques secondes. Puis il a déterminé une formule exacte de la taille du troupeau. Sur une station de travail d'une marque fort à propos (*Sun*, qui signifie «soleil» en anglais), le calcul a duré 90 minutes. Le nombre de têtes, dans le troupeau du soleil est le plus petit entier supérieur à $(p + q)(a + b\sqrt{4729494})^{4658}$, avec :

$$p = 25\,194\,541$$

$$q = 184\,119\,152$$

$$a = 109\,931\,986\,732\,829\,734\,979\,866$$

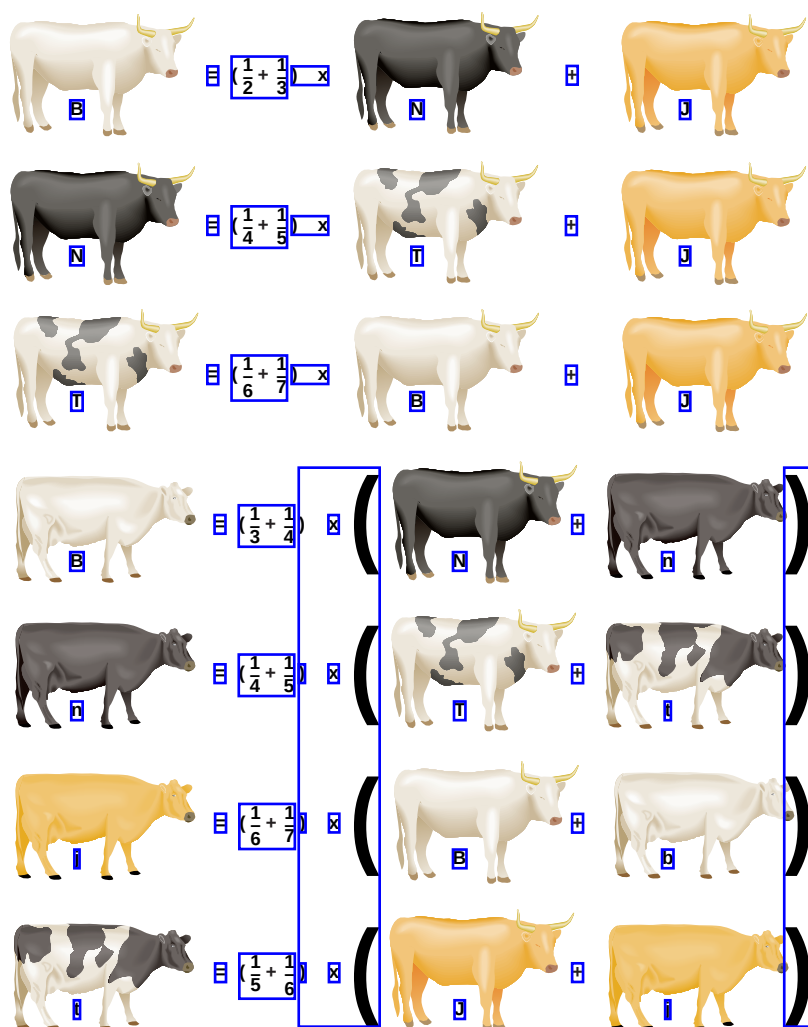
$$232\,821\,433\,543\,901\,088\,049$$

$$b = 50\,549\,485\,234\,315\,033\,074\,477$$

$$819\,735\,540\,408\,986\,340$$

Archimède a-t-il vraiment posé ce problème ? Selon les historiens, il est bien l'auteur du problème, mais il ne l'a pas formalisé en un poème. En revanche, il ne l'a certainement pas résolu : les nombres en jeu sont trop grands et les calculs, à la main, sont trop longs. Archimède savait-il que son équation a des solutions ? Probablement pas. Toutefois, il était sans doute capable de concevoir quel type d'équations était en jeu. Est-il bien raisonnable de ne pas connaître la réponse d'une énigme que l'on propose ?

Réponses : pour $D = 60$, $x = 4$ et $y = 31$; pour $D = 62$, $x = 8$ et $y = 63$.

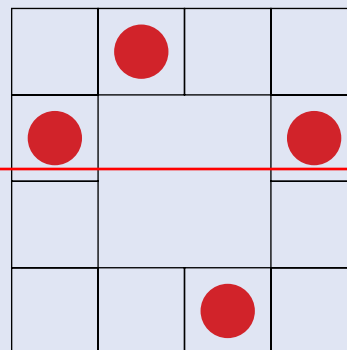


2. Ces sept équations expriment les sept premières conditions – les conditions faciles – à satisfaire par les huit variétés d'animaux du problème du troupeau du soleil.

Réactions

Dans l'article «Chœurs lumineux» (voir *Pour la Science*, mai 1999), je demandais aux lecteurs de me faire part de leurs découvertes à propos de damiers sur lesquels des lucioles ne peuvent se synchroniser. Cindy Eisner, en Israël, a analysé toutes les plaques de tailles modérées et précisé, pour chaque cas, la taille du plus grand groupe de lucioles pour lesquelles il n'y a pas de paires convergentes, c'est-à-dire de paires de lucioles qui synchronisent leur flash, ainsi que le nombre d'états initiaux qui ne mènent à aucune synchronisation. Par exemple, sur une plaque carrée de quatre cases de côté, le plus grand groupe sans paires convergentes a quatre lucioles placées au départ sur les cases 1, 4, 7 et 11 (voir la figure). Sur une plaque de 15 cases de côté, le plus grand groupe de lucioles non convergentes a 15 éléments disposés sur les cases 0, 4, 6, 8, 11, 13, 17, 21, 24, 27, 31, 37, 41, 46 et 51. Dans ce dernier exemple, il existe 124 523 états initiaux qui ne mènent pas à une synchronisation, sur un total de $7,20\,576.10^{16}$ états possibles.

De surcroît, quelle que soit la taille de la plaque, un groupe de deux lucioles a toujours une position initiale pour laquelle elles ne se synchronisent pas : par exemple, pour une plaque à n cases de côté, les cases 0 et $2n-3$. C. Eisner conjecture que ces deux positions sont les seules.



**LES NOMBRES DE 0 À 40 ORDONNÉS,
PAR ORDRE ALPHABÉTIQUE!**

cinq	seize	trois
deux	sept	un
dix	six	vingt
dix-huit	treize	vingt-cinq
dix-neuf	trente	vingt-deux
dix-sept	trente-cinq	vingt et un
douze	trente-deux	vingt-huit
huit	trente et un	vingt-neuf
neuf	trente-huit	vingt-quatre
onze	trente-neuf	vingt-sept
quarante	trente-quatre	vingt-six
quatorze	trente-sept	vingt-trois
quatre	trente-six	zéro.
quinze	trente-trois	

Des nombres à la lettre...

JEAN-PAUL DELAHAYE

L'écriture des nombres débouche sur un monde mathématico-littéraire où les «liponombres» sont un fleuron divertissant.

Le radical lipo vient du grec *leipo* «je laisse». Il sert de racine à quelques mots français : *lipothymie*, qui signifie brève perte de connaissance, et, sujet de cet article, *lipogramme*. Ce mot a été dérivé en lipogrammatique, lipogrammatiste, liponombre et lipopremier (de création récente, on va le voir).

Un lipogramme est, d'après le *Grand Larousse*, «une œuvre littéraire, en prose ou en vers, où l'on s'astreint à ne pas faire entrer une ou plusieurs lettres de l'alphabet». Comme le remarque Georges Perec

(auteur d'un fameux roman sans «e», *La disparition*), il serait malheureux de croire que lipogramme signifie lettre grasseuse ou, pire, un gramme de graisse! Bien sûr, il existe aussi de nombreux mots français commençant par lipo ou lipi qui proviennent cette fois de la racine grecque *lipos* signifiant «graisse» : lipide, liposoluble, etc. Pour corser le tout s'ajoute la LiPo, abréviation de Littérature Potentielle, qui est l'objet d'étude de l'Oulipo (Ouvroir de Littérature Potentielle), mouvement littéraire qui pratique et théorise les jeux for-

mels avec les textes littéraires, dont le lipogramme est l'exemple le plus pur.

Les lipogrammes ne sont pas universellement appréciés. Bescherelle, père et fils, en 1833, indiquaient que «les ouvrages lipogrammatiques sont de vaines puérilités». Il n'empêche que leur art est ancien et a été pratiqué dans de nombreuses langues, depuis fort longtemps et par de beaux esprits. Le mot existe en anglais : *lipogram*, en espagnol : *lipogramacia* ou *lipograma*, en allemand : *leipogram* ou *lipogram*.

On n'a pas attendu le xx^e siècle pour s'adonner à ce jeu de lettres et, selon Georges Perec, le plus ancien lipogrammatiste serait Lasos d'Hermione (qui vécut pendant la seconde moitié du vi^e siècle avant J.-C.), qui n'aimait pas la lettre *sigma*, le «s» grec, et dont il se priva dans une *Ode aux Centaures*, texte dont il ne reste aujourd'hui aucune trace, et dans un *Hymne à Demeter*, dont seul le premier vers nous est parvenu!

Au iii^e siècle, Nestor de Laranda conçut le projet fou de récrire l'*Iliade* en se privant de l'*alpha* dans le premier chant, du *bêta* dans le second, du *gamma* dans le troisième, etc. Deux cents ans plus tard, Tryphiodore de Sicile compléta le travail en récrivant l'*Odyssée* selon le même procédé. Ces textes, comme les précédents, ont été perdus, et le premier lipogramme attesté est le *De Aetatibus* de Fabius Planciade Fulgentius, qui ne contient pas de «a» dans son premier chapitre, pas de «b» dans le second, etc. Au début du $xvii^e$ siècle se constitua en Allemagne et en Italie une tradition de lipogrammes en «r» qui a persisté jusqu'à nos jours. Le fait d'armes de cette tradition est un roman sans «r» de 198 pages écrit par Franz Rittler au début du xix^e , et intitulé *Die Zwillinge* (Les jumeaux). Depuis, bien d'autres exploits ont été réalisés, et les lecteurs intéressés les trouveront détaillés dans *Une histoire du*

1. GRANDS NOMBRES : ARCHIMEDE ET LES INDIENS

Pour les puissances de 10, les Indiens (d'Inde!) furent supérieurs aux autres civilisations. Les anciens Grecs et les Chinois se sont arrêtés à la myriade (10^4) et se sont contentés de la répéter : 10^8 = une myriade de myriades ; 10^{12} = une myriade de myriades de myriades, etc. Ils lisaient ainsi le nombre 52 3622 1984 4368 2439, cinquante-deux myriades de myriades de myriades de myriades trois mille six cent vingt-deux myriades de myriades de myriades mille neuf cent quatre-vingt-quatre myriades de myriades quatre mille trois cent soixante-huit myriades deux mille quatre cent trente-neuf.

Conscient que cette opération de répétition pouvait engendrer de très grands nombres, Archimède, qui voulait dans l'*Arénaire* (le "compteur de sable") se faire une idée du nombre de grains de sable contenus dans une sphère ayant pour centre la Terre et atteignant le Soleil, s'est imaginé poursuivre la double étape de répétition une myriade de myriades de fois. Il en arrive ainsi à concevoir le nombre que nous noterions aujourd'hui $10^{8 \times 10^8}$, c'est-à-dire un "1" suivi de huit cent millions de zéros. Ce nombre fut, durant longtemps, le plus grand nombre imaginé par un être humain.

À la place de la myriade, les Arabes avaient pour palier le millier (mille, un millier de milliers, un millier de milliers de milliers, etc.). Ils obtenaient donc une écriture plus longue encore que celle des Grecs.

À partir du iii^e siècle, les Indiens avaient choisi un nom pour chaque puissance de dix jusqu'à 10^{17} , de sorte, que pour eux, le nombre 523622198443682439 est (en traduisant les chiffres en français et en écrivant – comme les Indiens – les unités en tête, puis les dizaines, etc.) : neuf et trois dasha et quatre shata et deux sahasra et huit ayuta et six laksha et trois prayuta et quatre koti et quatre vyarbuda et huit padma et neuf kharva et un nikharva et deux mahapadma et deux shankha et six samundra et trois madhya et deux antya et cinq parardha. Cette notation sanskrite suggère de ne faire apparaître que les chiffres (sans mentionner les termes dasha, shata, etc.), ce qui conduit à la notation décimale de position.

2. LIPOGRAMMES DES FABLES DE LA FONTAINE

Le campagnard et ses enfants

Ahanez, cravachez : le zèle,
Ce placement, est stable et ferme.
Ce fellah argenté, se sentant las et frêle,
Appela ses enfants et parla en ces termes.
"Ne vendez pas les champs venant de mes grands-pères
Et passés à mes descendants :
De l'argent est caché dedans.
Hélas, l'emplacement échappe à mes repères.
Cherchez-le sans relâche et percez le secret.
Bêchez, sarclez les champs dès septembre, et les prés.
Désherbez et grattez, ne les ménagez pas.
Cernez la place pas à pas."
Les enfants l'entendent et, le père trépassé,
S'attellent à la tâche ; et l'an étant passé,
Le champ recela davantage.
Pas de perle enterrée. Le secret de ce sage,
Partagé avec ses enfants :
L'acharnement, c'est de l'argent.
Nicolas Graner - octobre 1998.

**Un goupil aux raisins**

Un goupil gascon, on a dit parfois normand,
Assailli par la faim, vit au haut d'un grand mur
Un raisin mûr, fort attirant,
Qui paraissait un rubis pur.
L'animal aussitôt saliva, à l'affût,
Mais, voyant qu'il gisait trop bas :
"Ils sont trop sûrs, dit-il, bons pour un malotru!"
Aurait-il fallu qu'il grognât?
Nicolas Graner - septembre 1998.

**La fourmi rit du grillon.**

Un grillon bûcha sa voix
Tout un mois,
Puis comprit sa privation
Quand un mistral fit sanction :
Aucun tronçon minimal
D'asticot, pain animal.
Il alla vagir sa faim
Au voisin fourmi, afin
Qu'il mît à disposition
Du grain pour sa nutrition
Jusqu'à la saison d'avril.
"J'aurai du fric, lui dit-il,
À vous offrir, foi d'alto ;
J'y adjointrai un bon taux."
L'ami fourmi fut radin :
Pour lui, un mal plutôt doux.
Mais qu'as-tu fait au mois d'août?
Dit-il à l'intrus, soudain.
– À tout instant, jour ou nuit
J'improvisais, sans affront.
– Tu braillais? Nous admirons.
Va donc au bal aujourd'hui !
Gilles Esposito-Farèse - septembre 1998.



3. ADDITION DE LIPONOMBRES

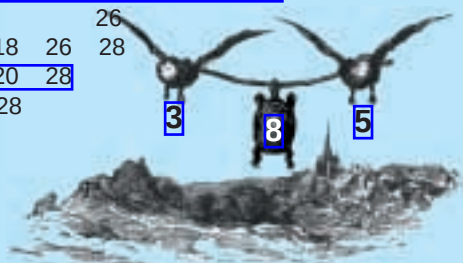
Les seuls liponombres (nombres qui ne comportent pas de "e" dans leur écriture en toutes lettres) inférieurs à un million sont : un, trois, cinq, six, huit, dix, dix-huit, vingt, vingt-trois, vingt-cinq, vingt-six, vingt-huit.

Voici leur table d'addition :

	1	3	5	6	8	10	18	20	23	25	26	28
1												
3												
5												
6												
8												
10												
18												
20												
23												
25												
26												
28												

Le résultat d'une série d'opérations dépend de l'ordre dans lequel on les effectue, autrement dit l'addition des liponombres n'est pas associative. Pour calculer "dix plus huit plus cinq", on peut calculer d'abord "dix plus huit", qui vaut dix-huit, puis ajouter cinq pour obtenir vingt-trois. Mais si l'on commence par calculer "huit plus cinq" le résultat intermédiaire n'est pas un liponombre, et l'on ne peut donc pas terminer le calcul. Dans l'ensemble des liponombres, $(10 + 8) + 5 = 23$, mais $10 + (8 + 5)$ n'est pas défini. Quand on fait la somme de trois nombres, dans certains cas aucune somme partielle de deux des trois nombres ne donne un liponombre, bien que la somme globale en soit un. Voici quelques exemples :

- un plus un plus un font trois,
- trois plus un plus un font cinq,
- dix-huit plus six plus un font vingt-cinq,
- vingt-trois plus un plus un font vingt-cinq,
- vingt-six plus un plus un font vingt-huit.



lipogramme de Georges Perec (publié dans l'ouvrage collectif OULIPO *La Littérature Potentielle*, Ed. Gallimard, 1973).

Venons-en aux découvertes remarquables faites il y a quelques mois par Nicolas Graner :

- il y a exactement 512 233 nombres premiers sans «e» (nous dirons lipopremiers), pas un de plus, pas un de moins !
- le plus grand lipopremier est : vingt-huit quintillions vingt-huit quadrillions vingt-huit trillions vingt-huit billions vingt-six milliards huit millions trois, soit : 28 000 028 000 028 000 028 000 003.

La justification de ces affirmations que nous allons détailler maintenant se fonde sur quelques raisonnements combinatoires amusants. Qu'est-ce qu'un liponombre et un lipopremier ? Pour cela, nous allons examiner l'écriture en toutes lettres d'un nombre.

ÉCRITURE DES NOMBRES EN FRANÇAIS

La question n'est pas simple. En effet, lorsque l'on traite de nombres dont le nom ne comporte pas de «e», il faut préciser de quel nom il s'agit, car tout nombre peut

s'écrire en toutes lettres de plusieurs façons en français. Le nombre *huit* (lipogramme en «e», «a» et «o») est aussi *quatre plus quatre* (lipogramme en «i» et «o»), *dix moins deux* (lipogramme en «a»), *cinq plus trois* (lipogramme en «a» et «e»), *deux plus six* (lipogramme en «a» et «o»), deux à la puissance trois, ou enfin «le nombre qui s'écrit un-zéro-zéro-zéro en base deux», etc. Chaque nombre peut bien sûr s'écrire d'une infinité de façons différentes (huit, par exemple, s'écrit : neuf moins un, dix moins deux, onze moins trois, etc.)

En écrivant n sous la forme «un plus un plus ... plus un» (n fois «un»), on obtient toujours une écriture lipogrammatique du nombre n en «e», «o» et «a» et «i». On établit ainsi que tout nombre est un lipogramme en n'importe quelle lettre.

Nous examinerons les liponombres, en nous référant à une définition normalisée qui donnera un nom officiel à chaque entier et nous ne nous intéresserons plus qu'aux lipogrammes en «e» (les plus difficiles, puisque «e» est la lettre la plus fréquente en français), que nous appellerons simplement liponombres.

Pour les nombres jusqu'à 10^{12} , c'est-à-dire mille milliards, l'orthographe française propose une écriture que nous adopterons comme base et qui fixe la notation officielle recherchée. Le nombre 32 644 255 232 628 s'écrit trente-deux mille six cent quarante-quatre milliards deux cent cinquante-cinq millions deux cent trente-deux mille six cent vingt-huit.

Pour les nombres au-delà de 10^{12} , différents systèmes ont été proposés, et le mieux est de s'en tenir à un texte officiel. Nicolas Graner a eu quelques difficultés à dénicher un tel texte, mais, il y a deux mois, il en a découvert un qui propose une norme pour l'écriture des grands nombres. Il s'agit d'une note annexée au décret n° 61-501 du 3 mai 1961 relatif aux unités de mesure et au contrôle des instruments de mesure (*Journal officiel* du 20 mai 1961) modifié par les décrets n° 75-1200 du 4/12/1975 et n° 82-203 du 26/2/1982. Cette note stipule : «Énoncé des très grands nombres. Pour énoncer les puissances de 10, à partir de 10^{12} , on applique la règle exprimée par la formule : $10^{6N} = N$ -illion. Exemples : $10^{12} =$ billion, $10^{18} =$ trillion, $10^{24} =$ quadrillion, $10^{30} =$ quintillion, $10^{36} =$ sextillion, etc.»

L'usage du etc. final est assez troublant dans un texte réglementaire et laisse indécise la question d'une nomenclature exhaustive : quels mots doivent être autorisés ? Pour lever cette énigme, adressons-nous donc aux dictionnaires. Celui de l'Académie française, dont aucune nouvelle version n'a paru depuis le texte de 1961, ne peut servir de référence. Nous utiliserons donc un dictionnaire disponible, et régulièrement mis à jour, le *Petit Robert*, et nous nous en tiendrons strictement à la terminologie qu'il mentionne. Il se trouve que les termes pour désigner des puissances de dix au-delà du milliard (bien sûr présent dans tous les dictionnaires français) qui possèdent une entrée dans le *Petit Robert* correspondent à ceux de l'article de 1961 : billion, trillion, quadrillion, quintillion, sextillion.

Nous adopterons donc la convention de 1961 en ne retenant que les termes qui y sont explicitement mentionnés. Plus loin, nous envisagerons ce que deviendraient les résultats de Nicolas Graner lorsqu'on étend ce vocabulaire de base.

Il faut remarquer que les termes de milliard, trilliard (parfois utilisés en français) ne pourront donc pas être employés dans un liponombre ou un lipopremier. Notons aussi que le terme de quadrillion (parfois utilisé) a été éliminé au profit de quadrillion.

En résumé, pour traiter notre problème des liponombres (sans «e»), les

seuls termes utilisés pour désigner des nombres supérieurs à mille que nous nous autoriserons seront : million (10^6), milliard (10^9), billion (10^{12}), trillion (10^{18}), quadrillion (10^{24}), quintillion (10^{30}) et sextillion (10^{36}).

Les nombres supérieurs à un sextillion devront être désignés sous la forme «mille sextillions», «dix mille millions de sextillions», «un sextillion de sextillions», «un sextillion de sextillions de sextillions», etc.

Plus généralement, pour un nombre très grand, on obtiendra son écriture canonique en le séparant en tranches de 36 chiffres, chacune étant décomposée en tranches de 6 chiffres. Par exemple, le nombre : 12 123456 000000 000000 000000 000000 000002 000003 000000 000000 001032 000067 s'écrit en écriture canonique : douze sextillions de sextillions de sextillions (première tranche) cent vingt-trois mille quatre cent cinquante-six quintillions de sextillions (deuxième tranche) deux quintillions trois quadrillions un milliard trente-deux millions soixante-sept (troisième tranche).

UNE SEULE LETTRE VOUS MANQUE ET TOUT EST DÉPEUPLÉ

Étudions les liponombres. En examinant un à un les nombres compris entre un et vingt pour éliminer ceux qui contiennent un «e», on découvre huit liponombres : un, trois, cinq, six, huit, dix, dix-huit, vingt. Ensuite, de vingt et un à vingt-neuf, on découvre quatre nouveaux liponombres : vingt-trois, vingt-cinq, vingt-six, vingt-huit. Nous avons donc douze liponombres inférieurs à trente, que nous appellerons liponombres de base : un, trois, cinq, six, huit, dix, dix-huit, vingt, vingt-trois, vingt-cinq, vingt-six, vingt-huit.

Entre trente et soixante-dix-neuf, on ne découvre aucun nouveau liponombre, car tous les nombres contiennent un mot se terminant par «ente» ou «ante». Tous les nombres des deux dizaines suivantes, qui commencent par «quatre-vingts», sont aussi à éliminer. Remarquons que la nomenclature belge ou suisse avec ces septante, octante ou huitante, nonante ne change rien à la liste des liponombres. Entre cent et neuf cent quatre-vingt-dix-neuf, tous les nombres contiennent le mot «cent», donc là encore pas de nouveaux liponombres. De mille à neuf cent quatre-vingt-dix-neuf mille neuf cent quatre-vingt-dix-neuf, chaque nombre contient le mot «mille», et donc pas de liponombres. Entre un et un million, notre collection se limite aux douze liponombres de base.

Ensuite les noms de grands nombres vus précédemment sont utilisés. Seul sex-

4. CHUQUET, L'ÉCHELLE COURTE ET L'ÉCHELLE LONGUE

Le mot million provient de l'italien *millione* ; il est apparu en France vers 1270. L'invention d'une terminologie allant au-delà est due à Nicolas Chuquet, qui rédigea un opuscule à Lyon en 1484 où il proposait d'ajouter au million (pour 10^6) les mots byllion (pour 10^{12}), tryllion (pour 10^{18}), quadryllion (pour 10^{24}), quyllion (pour 10^{30}), sixlion (pour 10^{36}), septyllion (pour 10^{42}), octyllion (pour 10^{48}) et nonyllion (pour 10^{54}). En termes modernes, un N-illion vaut 10^{6N} . C'est ce qu'on dénomme l'échelle longue.

Malheureusement, au XVII^e siècle, des grammairiens peu sensibles à la cohérence et à l'esthétique du système de Chuquet proposèrent d'autres définitions des mots introduits par Chuquet (dont l'orthographe évolua légèrement). Le principe de cette échelle courte n'est plus de sauter de 6 en 6, mais de 3 en 3, autrement dit de considérer qu'un billion vaut 10^9 (un billion = un milliard), un trillion vaut 10^{12} , etc. (un N-illion vaut 10^{3N+3}).

Depuis, une dangereuse confusion règne, et cela d'autant plus que, selon les pays, l'usage a retenu soit l'échelle longue de Chuquet, 10^{6N} , soit l'échelle courte 10^{3N+3} . Même en langue anglaise, l'accord est incertain : l'échelle courte a été adoptée aux États-Unis, alors que l'échelle longue a la faveur des Britanniques.

La neuvième Conférence générale des poids et mesures de 1948 a recommandé d'employer l'échelle longue. La *Grande Encyclopédie Larousse* se conforme à cette recommandation, ainsi que le texte réglementaire de 1961, repéré par N. Graner. Pour des raisons à la fois historiques, esthétiques, légales et en respect à la recommandation de la Conférence des poids et mesures de 1948, on doit donc retenir aujourd'hui l'échelle longue. C'est ce qu'a fait Nicolas Graner pour déterminer les lipopremiers. Signalons que, concernant le mot milliard (qui ne fait pas partie du système de Chuquet), tous les utilisateurs s'accordent pour lui attribuer la valeur 10^9 ; aucun risque n'est donc impliqué par l'usage de ce mot.

tion comporte un «e», et donc il nous reste : million, milliard, billion, trillion, quadrillion, quintillion.

Les noms des nombres plus grands qu'un sextillion contiennent tous le mot «sextillion» et ne sont pas des liponombres, d'où le premier résultat de Nicolas Graner : le nombre des liponombres est fini.

COMBIEN DE LIPONOMBRES?

Nous allons compter les liponombres, en examinant comment se combinent les douze liponombres de base avec les six noms de grands nombres. Un liponombre typique est : trois quintillions vingt-six quadrillions huit trillions six billions vingt milliards cinq millions trois. Plus généralement, tous les liponombres sont de la forme : C1 quintillion(s) C2 quadrillion(s) C3 trillion(s) C4 billion(s) C5 milliard(s) C6 million(s) C7, où chacun des nombres C1, C2, ..., C7 est, soit l'un des douze liponombres de base, soit zéro, auquel cas ce nombre et le nom qui le suit sont supprimés de l'écriture en toutes lettres.

Remarquons que C1, C2, ..., C7 ne peuvent être tous nuls (sinon, le nombre obtenu serait zéro, qui contient un «e»). On désigne donc sans ambiguïté un liponombre par la donnée de sept nombres

C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7 que nous nommerons ses «composantes» et dont chacune est l'une des treize valeurs 0, 1, 3, 5, 6, 8, 10, 18, 20, 23, 25, 26 ou 28. On en déduit que :

- le plus grand liponombre existant a pour composantes 28, 28, 28, 28, 28, 28, 28 ce qui donne : vingt-huit quintillions vingt-huit quadrillions vingt-huit trillions vingt-huit billions vingt-huit millions vingt-huit, ou, en écriture décimale habituelle : 28 000 028 000 028 000 028 028 028 000 028.

- le liponombre ayant le nom le plus long s'obtient à partir du précédent, celui-ci en remplaçant tous les huit par des trois.
- le liponombre le plus petit, c'est évidemment «un», qui est aussi celui dont le nom est le plus court.

La caractérisation des liponombres par leurs composantes conduit à leur dénombrement précis. Puisque chacune des sept composantes peut prendre treize valeurs, le nombre de combinaisons possibles est 13^7 , auquel il faut retrancher un (pour le cas où toutes les composantes sont nulles). Il existe donc en tout $13^7 - 1$ soit 62 748 516 liponombres.

Nous sommes maintenant armés pour aborder le problème des liponombres premiers ou lipopremiers. Comme chacun le sait, un nombre premier est un nombre qui n'est divisible que par un et par lui-même, comme 2, 3, 5, 7, 11, 13. Euclide



5. LES NOMS PROPOSÉS PAR J. H. CONWAY

Le célèbre mathématicien John Conway (à gauche) et le linguiste Allan Wechsler ont soigneusement mis au point un système qui permet de nommer les N-illions au-delà de $N = 9$, ce qui prolonge donc le système de Chuquet.

Ce système attribue un nom normalisé (en anglais, mais aussi en français, car l'adaptation est immédiate) à toutes les puissances de 10 de la forme 10^{6k} , et donc à tous les entiers.

On traite d'abord le cas où $9 < N \leq 999$ en utilisant le tableau

suivant :

UNITÉS	DIZAINES	CENTAINES
1 un	(n)dec	(n)(x)cent
2 duo	(n)vingint	(n)ducent
3 tre	(n)(s)triginta	(n)(s)trecent
4 quattuor	(n)(s)quadraginta	(n)(s)quadringenti
5 quinqa	(n)(s)quinquaginta	(n)(s)quingenti
6 se	(n)sexaginta	(n)sescent
7 sept	(n)septuaginta	(n)septingenti
8 octo	(m)(x)octoginta	(m)(x)octingenti
9 nove	nonaginta	nongenti

– *tre* devient *tres* et *se* devient *ses* devant les mots précédés d'un (s) : exemple *trestrecent*

– *se* devient *sex* devant les mots précédés d'un (x)

– *sept* et *nove* deviennent *septem* et *novem* devant les mots précédés d'un (m)

– *sept* et *nove* deviennent *septen* et *noven* devant les mots précédés d'un (n)

Un 543-illion = $10^{543 \times 6}$ s'appelle ainsi un tresquadragintaquingentillion.

Pour un N au-delà de mille, le N-illion s'obtient : (i) en séparant les chiffres de N par tranches de 3 (exemple : 81 000 000 321) ; (ii) en juxtaposant les noms donnés par le tableau ci-dessus ; (iii) en remplaçant illion par illi tant qu'on n'est pas au bout ; (iv) en utilisant nilli pour 0 quand c'est nécessaire.

Ainsi, un 81 000 000 321-illion = $10^{6 \times 81000000321}$ est donc un unoctogintillinillinillinunvigintitrecentillion

Le nombre d'Archimède $10^{8 \times 10^8} = 10^{800000000} = 100 \times 10^6 \times 133\ 333\ 333$ est donc : cent tetrigintacentillitetrigintatrecentillitetrigintatrecentillion.

nous a appris qu'il existe une infinité de nombres premiers, mais combien existe-t-il de lipopremiers ?

NOMBRE DE LIPOPREMIERS

Puisqu'il n'existe qu'une soixantaine de millions de liponombres en tout, il serait possible, avec un ordinateur de bureau, de les tester un par un pour trouver lesquels sont premiers. Il est plus amusant d'éliminer d'emblée ceux dont on voit facilement qu'ils ne peuvent pas l'être, car multiples de 2, 3 ou 5.

On sait que tout nombre qui se termine par 0, 2, 4, 6 ou 8 est pair, donc ne peut pas être premier. Un liponombre pair de composantes C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7 s'obtient donc en choisissant une valeur parmi treize pour C1, pour C2, jusqu'à C6, puis une valeur parmi huit (0, 6, 8, 10, 18, 20, 26 ou 28) pour C7. En prenant en compte le cas où tous les Ci sont nuls, le nombre des lipo-

nombre pairs est $(13^6 \times 8) - 1 = 38\ 614\ 471$. De même, on voit qu'il y a $13^6 \times 5$ liponombres impairs. Les nombres terminés par 0 ou 5 sont des multiples de 5, donc ne sont pas premiers (sauf 5, bien sûr). Ce sont les liponombres pour lesquels C7 vaut 0, 5, 10 ou 25. Ceux terminés par 0 ou 10 ont déjà été éliminés. Les liponombres divisibles par 5, mais non par 2, sont donc ceux terminés par 5 ou 25, qui sont au nombre de $13^6 \times 2$. On voit finalement que les liponombres pouvant être premiers sont donc ceux pour lesquels C7 vaut 1, 3 ou 23, plus le nombre 5 lui-même, c'est-à-dire $(13^6 \times 3) + 1 = 14\ 480\ 428$.

Intéressons-nous maintenant aux multiples de 3. On sait qu'en base dix un nombre est divisible par 3 si et seulement si la somme de ses chiffres l'est. Dans le cas des liponombres, cela revient à dire que la somme C1 + C2 + ... + C7 est divisible par 3. Nous savons déjà que C7 doit être égal à 1, 3 ou 23,

nombres qui ont pour restes respectifs 1, 0 et 2 dans la division par 3. Donc, une fois connus C1, C2 ... C6 (pour un liponombre non multiple de 2 ou 5), il y a toujours une façon unique de trouver C7 pour que le nombre résultant soit multiple de 3.

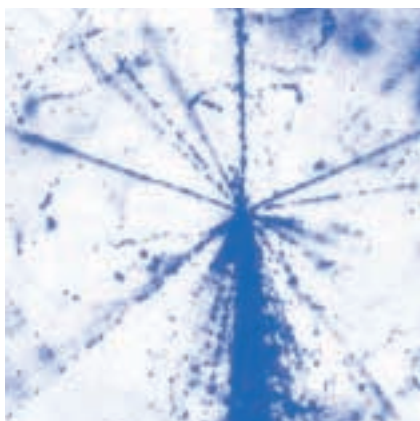
On obtient ainsi que le nombre de liponombres potentiellement premiers (non multiples de 2, 3 ou 5) est : $(13^6 \times 2) + 1 = 9\ 653\ 619$.

Nicolas Graner a testé tous ces nombres un par un à l'aide d'un programme capable de déterminer efficacement si un nombre est premier ou non. Il a utilisé une méthode probabiliste : lorsque le programme affirme qu'un nombre est composé, il l'est effectivement, mais, lorsque le programme affirme qu'un nombre est premier, il y a un risque pour qu'il ne le soit pas réellement. Le risque d'erreur qu'il a accepté de prendre est d'environ 10^{-15} , ce qui fait qu'on doit être confiant dans son résultat. Une vérification n'utilisant pas un algorithme probabiliste est possible et sera sans doute rapidement faite. La conclusion de cette étude exhaustive et des calculs de l'ordinateur est : il existe exactement 512 233 lipopremiers.

Les plus petits (qu'on peut bien sûr trouver à la main) sont : trois, cinq, vingt-trois, un million trois, six millions vingt-trois, huit millions vingt-trois, etc., ce qui, en écriture décimale, donne 3, 5, 23, 1 000 003, 6 000 023, 8 000 023, etc.

Plus intéressant, la recherche de Nicolas Graner aboutit au résultat suivant : le plus grand lipopremier est : vingt-huit quintillions vingt-huit quadrillions vingt-huit trillions vingt-huit billions vingt-six milliards huit millions trois, soit 28 000 028 000 028 000 028 026 008 000 003.

On constate que la proportion de nombres premiers parmi les liponombres est : $512\ 233 / 62\ 748\ 516$, soit environ $1/122$. Or, parmi l'ensemble de tous les entiers inférieurs à vingt-huit quintillions, cette proportion est d'environ $1/71$. Un liponombre pris au hasard a donc nettement moins de chances d'être premier qu'un entier pris au hasard (mais inférieur à la limite des liponombres) ! Cela s'explique par le fait que le dernier chiffre des liponombres n'est pas réparti uniformément, mais est déterminé par les treize valeurs possibles de la dernière composante. La proportion de liponombres divisibles par deux ou cinq est de $10/13$ (77 pour cent) contre seulement $6/10$ (60 pour cent) pour les nombres ordinaires. En éliminant tous les multiples de 2 et de 5, la proportion de nombres premiers parmi les liponombres **restants** **est** : $512\ 233 / 14\ 480\ 428 = 1/28$, ce qui cette fois correspond, à peu de chose près, à la proportion de nombres premiers parmi



De la lumière plein les yeux

ROLAND LEHOUCQ • HERVE DZITKO

Les yeux fermés, les astronautes en route vers la Lune voient des étoiles aux formes variées. À quoi est dû cet étrange phénomène ?

L'atmosphère de la Terre a d'immenses effets bénéfiques. Elle fournit l'oxygène nécessaire à notre métabolisme, elle maintient une température agréable avec l'effet de serre, mais aussi elle dresse un écran entre nous et le rayonnement cosmique qui emplit le Système solaire.

A mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère, l'épaisseur de la couche protectrice diminue et la quantité de rayonnement reçu augmente, au point que, hors de l'atmosphère, des phénomènes inhabituels se produisent. Les astronautes des sept dernières missions *Apollo* – celles qui ont voyagé vers la Lune – ont tous vu des éclairs lumineux alors qu'ils avaient les yeux fermés ! Ces phosphènes peu colorés et d'aspects variés résultent du passage dans l'œil d'une particule rapide qui a traversé le blindage de la cabine spatiale.

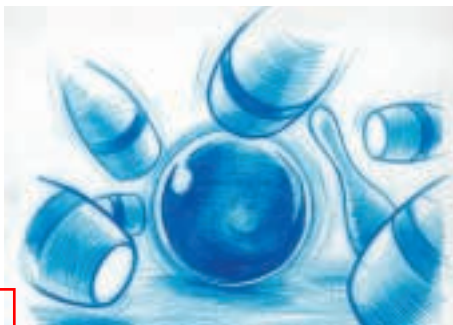
En 1912, lors d'une ascension en ballon, le physicien allemand Victor Hess remarque qu'à mesure que le ballon s'élève un « rayonnement » décharge un électroscope, et ce d'autant plus vite qu'il est haut.

Attribué d'abord à une source de rayonnement électromagnétique extraterrestre, ce phénomène est ensuite expliqué par l'impact de diverses particules chargées (elles étaient déviées par un champ magnétique) : ce sont essentiellement des protons (89 pour cent), des noyaux d'hélium (10 pour cent), le reste étant des électrons et des noyaux lourds (jusqu'à l'uranium). Ces particules cosmiques sont caractérisées par leur charge et par leur énergie. La majorité des protons a une énergie d'environ 5×10^8 d'électronvolts, mais certaines particules peuvent avoir une énergie colossale, jusqu'à 10^{20} électronvolts pour les plus énergiques, soit l'équivalent de l'énergie cinétique d'une balle de tennis lancée à plus de 60 kilomètres par heure !

D'où viennent ces particules ? Certaines sont éjectées par les éruptions solaires, avec des énergies de l'ordre de quelques 10^9 électronvolts. À la surface de la Terre, nous ne sommes pas directement exposés à ces particules : le champ magnétique terrestre piège les particules dont l'énergie est inférieure à environ 10^9 électronvolts. À l'inverse, les particules galactiques, d'énergie supérieure, sont engendrées par des astres lointains (peut-être des supernovae) et se manifestent au sol, après avoir été transformées.

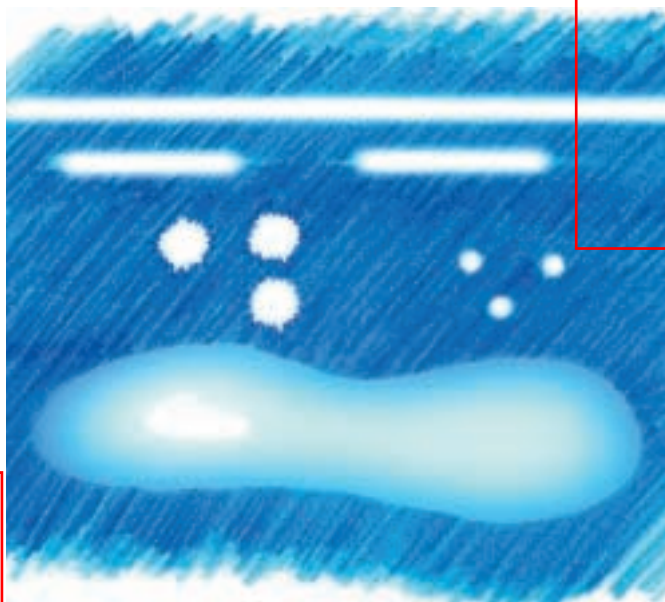
LA GERBE COSMIQUE

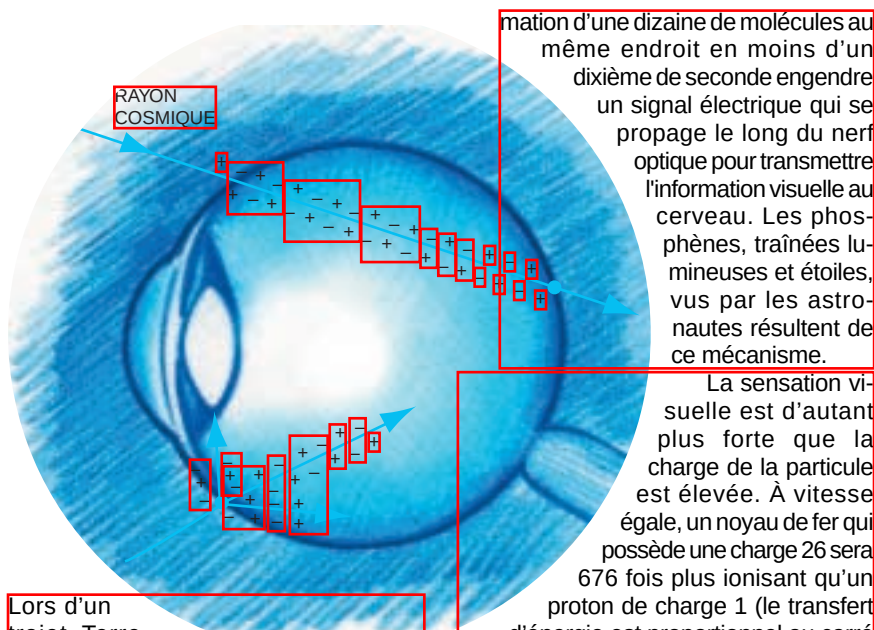
Après un voyage de plusieurs millions d'années, une particule galactique chargée atteint les couches supérieures de l'atmosphère, elle excite le cortège électronique des atomes proches de sa trajectoire et arrache parfois certains électrons et elle brise les liaisons



moléculaires ou déclenche des réactions nucléaires. Les produits de réactions interagissent à leur tour avec le milieu, arrachant d'autres électrons ou produisant une gerbe de particules secondaires. L'énergie d'une particule cosmique se trouve ainsi dissipée dans l'atmosphère et répartie dans les nombreuses particules qui atteignent finalement le sol. En moyenne, chaque seconde, une centaine de particules secondaires bombardent chaque mètre carré de sol. Doit-on s'inquiéter de cette radioactivité spatiale ? Pas vraiment, car elle ne représente que quelques pour cent de la radioactivité naturelle qui provient du sol (granit radioactif, uranium...).

Eloignons-nous du sol. A mesure que l'on s'élève, la radioactivité terrestre diminue et celle de ces particules cosmiques augmente. Au sommet du Mont-Blanc, l'irradiation cosmique est dix fois supérieure de ce qu'elle est à Paris. À l'altitude où vole un avion, la dose de rayonnement cosmique est multipliée par 100 (bien que la carlingue en arrête une partie).





Lors d'un trajet Terre-Lune, les astronautes ne bénéficient plus de la protection du champ magnétique terrestre et de l'atmosphère. Seules les parois de la capsule spatiale les protègent du rayonnement ambiant. Les particules capables de franchir cette barrière sont les plus énergiques de sorte que, lorsqu'elles traversent l'œil d'un astronaute, elles agissent comme une boule de bowling qui chamboule l'arrangement des quilles que sont les atomes et les molécules de l'œil. Les effets sont d'autant plus importants que la charge des particules est élevée.

Ces particules déforment la rhodopsine, une molécule des cellules photoréceptrices de la rétine, d'une manière particulière nommée isomérisation (le signal visuel habituel résulte de l'isomérisation de cette molécule lors de l'interaction avec un photon du domaine visible). La défor-

mation d'une dizaine de molécules au même endroit en moins d'un dixième de seconde engendre un signal électrique qui se propage le long du nerf optique pour transmettre l'information visuelle au cerveau. Les phosphores, traînées lumineuses et étoiles, vus par les astronautes résultent de ce mécanisme.

La sensation visuelle est d'autant plus forte que la charge de la particule est élevée. À vitesse égale, un noyau de fer qui possède une charge 26 sera 676 fois plus ionisant qu'un proton de charge 1 (le transfert d'énergie est proportionnel au carré de la charge). Son pouvoir d'ionisation est tel qu'un seul noyau de fer peut engendrer des erreurs dans les mémoires de bord des satellites ou même détruire des composants électroniques. Sans protection adéquate, ce que les ingénieurs nomment le durcissement, les microprocesseurs de nos ordinateurs de bureau ne survivraient pas longtemps dans l'espace.

L'EFFET CERENKOV DANS L'ŒIL

Un second mécanisme explique ces visions : dans un milieu transparent, les particules dont la vitesse est suffisante peuvent perdre de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique (plus l'énergie d'une particule est élevée, plus sa vitesse est grande). En 1934, Pavel Alekseïevitch Cerenkov expliqua pour-

quoi les solutions de sel de radium émettaient une faible lueur bleutée. Lorsqu'une particule chargée se déplace plus vite que la lumière dans un milieu transparent, il se produit une « onde de choc lumineuse », similaire au passage du mur du son par un avion (la vitesse de la lumière dans un milieu donné est le quotient de vitesse de la lumière dans le vide et de l'indice de réfraction du milieu, de sorte qu'elle est toujours inférieure à la vitesse de la lumière dans le vide). Une lumière bleutée est alors émise le long d'un cône dont l'ouverture dépend de la vitesse de la particule et de l'indice de réfraction du milieu. Cette lueur bleutée est visible dans l'eau qui entoure les cœurs de réacteurs nucléaires ou dans les piscines de stockage de combustibles irradiés.

L'humeur vitreuse de l'œil humain ayant un indice de 1,34, la lumière s'y déplace à 223 000 kilomètres par seconde. Pour qu'une particule y émette un rayonnement Cerenkov, il faut que sa vitesse soit supérieure à cette valeur ce qui, dans le cas d'un proton, correspond à une énergie cinétique de $4,70 \times 10^6$ électronvolts. Ainsi, quelques centaines à quelques milliers de photons, émis lors du passage d'une particule cosmique, ont induit dans les yeux des astronautes des missions Apollo des phénomènes lumineux diffus.

L'espace interplanétaire est balayé par un rayonnement cosmique de haute énergie qui représente un danger potentiel, tant pour les astronautes que pour les systèmes électroniques. Les rayons cosmiques galactiques apportent à eux seuls une dose annuelle proche de la dose maximale admissible. Pour un vol interplanétaire de plusieurs mois (le voyage aller-retour vers Mars durera plus de 500 jours dans l'espace interplanétaire), un caisson blindé ou d'eau de plusieurs dizaines de centimètres d'épaisseur assurera une protection efficace de l'équipage, notamment contre les particules émises par les éruptions solaires.

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA où **Hervé DZITKO** travaille sur les radiations cosmiques.

P. McNULTY, *Single event effects experienced by astronauts and microelectronic circuits flown in space*, in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 43, n°2, p. 475, 1996.

J. BAILEY et coll., *Light flashes observed by astronauts on Apollo 11 through Apollo 17*, in *Science*, vol. 183, p. 957, 1974.

G. FAZIO et coll., *Generation of Cerenkov light flashes by cosmic radiation within the eyes of Apollo astronauts*, in *Nature*, vol. 228, p. 260, 1970.



Histoire des sciences

Des causes et des signes des maladies aiguës et chroniques

Arétée de Cappadoce (traduit par R.T.H. Laennec), édité et commenté par Mirko Grmek. Éditions Droz, 2000 (131 pages, 200 francs).

Les maladies dans l'art antique

Mirko Grmek et Danielle Gourevitch. Éditions Fayard, 1999 (518 pages, 180 francs).

Histoire de la pensée médicale en Occident

Sous la direction de Mirko Grmek (tome 3 : Du romantisme à la science moderne). Éditions du Seuil, 1999 (422 pages, 299 francs).

Le 6 mars 2000 nous quittait Mirko Grmek, protagoniste de l'histoire de la médecine et des sciences de la vie. Le 7 mars, de chez l'éditeur Droz, de Genève, arrivait à l'École pratique des hautes études, où il avait été directeur d'études, son livre posthume, l'édition d'Arétée de Cappadoce : *Des causes et des signes des maladies aiguës et chroniques*, traduit par R.T.H. Laennec. Cet auteur grec d'époque romaine donne, en effet, d'admirables descriptions de maladies qui avaient séduit l'excellent helléniste qu'était Laennec, mais cette traduction était restée inédite dans les collections de la Bibliothèque universitaire de Nantes. Mirko Grmek y manifeste, dans toute leur force, son érudition, sa patience, sa minutie, alliées à l'ampleur de ses vues, présentant ainsi une sorte d'histoire de la médecine antique et une histoire de certains concepts de la médecine anatomo-clinique.

Beau livre, lors d'une fin de carrière admirable, si l'on considère qu'il avait aussi publié en 1998 un livre en collaboration : *Les maladies dans l'art antique* (Éditions Fayard), couronné par l'Académie de médecine (prix Cosme 1999) et par l'Académie des inscriptions et belles-lettres (prix Reynaud 2000, attribué tous les cinq ans). Le fait que j'en sois le coauteur m'interdit d'en dire plus



Mirko Grmek.

que quelques mots : il s'agit de compléter la connaissance des pathocénoses antiques par l'iconodiagnostic, c'est-à-dire tout ce que peut enseigner l'observation minutieuse des œuvres d'art qui représentent, volontairement ou, mieux encore, involontairement, des cas pathologiques. Je tiens à rendre hommage à l'aptitude de ce maître à la connivence intellectuelle et à l'art difficile de jouer à quatre mains.

L'année 1999 avait vu l'achèvement d'un troisième type de travail où Mirko Grmek excellait aussi : la direction d'ouvrages, avec le tome 3 de *Histoire de la pensée médicale en Occident* (Éditions du Seuil). Si l'ensemble de ces trois volumes n'avait pas été écrit de sa main, il avait été intimement organisé par lui. Il avait rédigé les chapitres concernant les thèmes auxquels il tenait particulièrement : l'histoire, notamment, du concept de maladie, selon une sorte de «platonisme médical» (comme l'a écrit Franco Voltaggio dans le journal *Il Manifesto* du 9 mars), considérant les maladies comme des idées plutôt que des choses ; et la notion de pathocénose, établie par lui, selon laquelle la présence et l'importance d'une maladie dans une population donnée et à une époque donnée ont un rapport intime avec celles des autres maladies. Il avait choisi la collaboration pour d'autres chapitres, et laissé la plume à des collègues pour d'autres encore, mais toujours avec une idée exacte de la place du moellon dans le mur. Ainsi est née une véritable histoire de la pensée médicale, structurée et cohérente, dans une perspective résolument occidentale, mais, aussi, supranationale. Ce qui avait été relativement facile à obtenir pour les temps anciens, qui ne suscitent plus qu'exceptionnellement de passion nationaliste, était une gageure pour le monde moderne, qui a connu – et connaît – des nationalismes brutaux, même chez ceux qui ont pour fonction de les reconnaître et de les dénoncer.

Les trois derniers travaux d'édition français de Mirko Grmek (il en est aussi d'italiens ou de croates) sont le fruit, direct ou indirect, de son enseignement à l'École pratique des hautes études, section des sciences historiques et philologiques, institution qui lui convenait particulièrement par la totale liberté qu'elle permet à ses directeurs d'études, mais qui exige d'eux patience, critique et échanges pluridisciplinaires. Mirko Grmek y avait attiré des chercheurs, jeunes et chevronnés, de tout le monde occidental, et il y était devenu un maître. Ces travaux sont le couronnement et la conclusion d'une œuvre, mais aussi des modèles sur la voie tracée pour l'avenir d'une discipline qu'il a transformée.

Danielle GOUREVITCH

Chimie

Détergents et produits de soins corporels

Louis Ho Tan Tai. Éditions Dunod, 1999 (479 pages, 490 francs).

Chacon garde en mémoire les redoutables «enzymes gloutons» qui dévoraient goulûment les taches les plus rebelles, ou la «nouvelle formule» capable de laver le linge à basse température grâce au «TAED» (quel téléspectateur devine que ce produit est la tétraacétyléthylène diamine, précurseur de l'acide peracétique ?). Omniprésents dans la vie des consommateurs, les détergents parviennent à être, tout à la fois, indispensables, caricaturés par des publicités apparemment infantiles, vilipendés pour les pollutions qu'ils sont supposés engendrer et, surtout, mal connus de tous, y compris de la communauté des chimistes.

En réalité, la conception des détergents et des produits de soins modernes fait appel aux concepts scientifiques les plus évolués : biotechnologie, physico-chimie des liposomes et des polymères hydrophiles, oxydation catalytique sélective, déformulation des produits complexes... L'obtention d'une formule performante est si difficile que les entreprises gardent jalousement leurs secrets. Aussi la publication, par un expert reconnu, d'un ouvrage qui décrit, en détail et de façon pragmatique, l'état actuel des connaissances sur la formulation des détergents et des produits de soins corporels constitue un événement. Ce livre

se veut complet, c'est-à-dire qu'il traite aussi bien des principes de la formulation que des aspects industriels. Ce parti pris donne, sous une forme synthétique et cohérente, une mine d'informations théoriques et pratiques sur ces produits.

La première partie du livre est consacrée à la formulation proprement dite, c'est-à-dire à la description de la synthèse des tensioactifs (molécules composées d'une partie hydrophile et d'une partie hydrophobe), au mécanisme d'action de chaque type d'ingrédients et à la description des principales familles de produits de nettoyage et d'entretien du linge (lessives, assouplisseurs textiles), des surfaces dures (produits pour la vaisselle, récurants), de la peau (savons, gels pour la douche), des cheveux (shampooings, après-shampooings) et des dents (dentifrices). La présentation est identique pour chaque produit : exposé du cahier des charges, rôles des ingrédients qui entrent dans la composition des formules, exemples précis de formules extraites de brevets.

Curieusement les parfums des détergents, si importants pour les consommateurs, n'ont pas été placés dans cette première partie. L'auteur estime qu'ils ne contribuent pas directement aux performances du produit, mais son choix est discutable : la performance ne doit-elle pas inclure tous les paramètres pris en compte par l'utilisateur pour choisir son produit, y compris le plaisir de porter un vêtement qui dégage une odeur fraîche ?

La seconde partie, plus brève, traite des aspects industriels de la formulation. Toutes les opérations non chimiques nécessaires à la transformation d'une formule de laboratoire en un produit commercialisable y sont détaillées. On retrouve bien sûr les procédés de fabrication, les emballages, l'assurance qualité et les tests consommateurs, mais également des opérations plus spécifiques à la formulation, telles les mesures de l'efficacité des détergents, l'analyse des formules complexes (la « déformulation »), ainsi que des procédures d'évaluation des risques toxicologiques et écotoxicologiques. Le livre s'achève sur une présentation des nouvelles tendances et d'un certain nombre de grandes questions encore posées aux formulateurs.

Cet ouvrage, clair et bien illustré, remplit parfaitement sa mission : il explique bien la démarche qui préside à la mise au point d'un produit performant, adapté aux besoins et aux contraintes des consommateurs. Il constitue une référence indispensable pour tous les étudiants et pour les professionnels qui s'intéressent à la formulation des détergents et des produits de soins corporels ou à leurs ingrédients.

Jean-Marie AUBRY

Botanique

Le monde des tourbières et des marais

Sous la direction d'Olivier Manneville. Éditions Delachaux & Niestlé, 1999 (320 pages, 270 francs).

Ce beau livre, œuvre d'une équipe de spécialistes dirigée par Olivier Manneville, président du Groupe d'études des tourbières, réalise la performance de présenter de façon claire, précise et complète, en un volume maniable, le bilan scientifique et les problèmes de toutes natures relatifs aux milieux palustres. Peut-on rendre compte d'une telle somme sans tomber dans la sèche énumération de ses mérites ?

Longtemps, marais et tourbières ont eu la réputation d'espaces mystérieux et maléfiques, générateurs de « miasmes » aux effets redoutables, craintes que les études parasitologiques confortèrent lors des découvertes relatives au cycle de l'hématozoaire du paludisme ou de la grande douve du foie (pour ne citer que des fléaux qui ont sévi, au siècle dernier, en Europe tempérée). Ces étendues hostiles devaient donc être « assainies » ; la loi en fit longtemps une obligation. Dès le XVII^e siècle, la plupart des grandes zones humides de notre pays furent l'objet de travaux considérables de « bonification » : dans de nombreuses régions de France, drainage, mise en culture et plantations les firent régresser, sinon disparaître. Ont été de peu de poids les réticences de leurs utilisateurs tradition-

nels, dont l'ouvrage relate les activités : coupe de roseaux, extraction de tourbe, pêche des poissons et des grenouilles, chasse...

L'exemple des conflits d'usage, dans les marais de la Souche (Aisne), entre les chasseurs, désireux de maintenir le marais en eau, et les agriculteurs ou planteurs de peupliers, demandant son assèchement, est particulièrement intéressant. Le bilan financier des opérations de drainage, abusivement qualifiées de « mise en valeur », ne fut presque jamais pris en compte ; beaucoup ont été des échecs ruineux. Il est instructif, à cet égard, de lire un article publié par *Le Monde* le 24 janvier 1950, reproduit 50 ans après dans le même quotidien, au titre significatif : « Un Zuyderzee normand », à la gloire des tentatives (vaines !) d'assèchement du marais Vernier (Eure). Sa conclusion mérite citation : « Aujourd'hui l'homme a vaincu l'eau, et la charrue passe sur des terres où ne poussaient autrefois que des broussailles. » De nos jours encore, cet état d'esprit subsiste chez nombre de responsables, notamment au plan local : ces espaces, impropres à toute culture, sont aptes à recevoir sans contestations décombres et ordures, et, après comblement, à devenir sources de profits par la création de zones industrielles ou urbaines.

De longue date, cependant, la singulière beauté des paysages palustres a ému des écrivains, des artistes, des naturalistes. Bref, des rêveurs invétérés. Parmi les citations poétiques ou pittoresques des premiers, retenons le récit de Lamartine, qui faillit être piégé par la tourbière flottante du Grand-Lemps (Isère, récente réserve naturelle). Les derniers cités ont progressivement découvert la prodigieuse richesse naturelle des marais : l'ouvrage



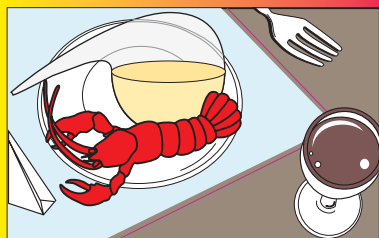
Une tourbière des Hautes Alpes, vers 2 200 mètres, avec les panaches blancs des linaigrettes.

FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monchicourt :

Info Sciences

Tous les jours
sur **France Info**
à 15 heures 41,
17 heures 10,
20 heures 12,
22 heures 12,
et 23 heures 42



Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 29 mai 2000.



Une palse (énorme bombement de tourbe et de glace, type de tourbière caractéristique de la taïga subarctique) dans le grand Nord du Québec.

en dresse un panorama quasi exhaustif, remarquablement illustré, qui s'étend des algues microscopiques jusqu'aux plantes supérieures, en passant par les champignons symbiotiques ou par les sphaignes (mousses des marais acides) capables, en créant leurs propres conditions de vie, de construire des tourbières. En raison des fortes contraintes subies (climat local rigoureux, même en zone tempérée, substrat asphyxiant et souvent acide...), les organismes soumis à d'impitoyables processus de sélection sont originaux : plantes insectivores, éricacées (le groupe de la myrtille ou de la bruyère), symbiotiques ou à structures xérophytiques, orchidées, linaigrettes (plantes herbacées portant des touffes soyeuses de fruits)... confèrent aux paysages des tourbières leur singulière splendeur et réalisent des groupements végétaux d'une extrême diversité. Directement ou indirectement tributaire de la végétation (la chenille d'un papillon se nourrit exclusivement de canneberge, végétal strictement lié lui-même à la tourbière haute), la faune est l'objet d'un chapitre remarquable : il raconte, par exemple, l'occupation de l'espace par les araignées d'une cladiaie, la microfaune d'une butte de sphaignes...

L'étude des tourbières a bien d'autres implications. Les méthodes de la palynologie (l'étude des pollens actuels et fossiles), ses résultats appuyés par de nombreux et remarquables exemples permettent de retracer l'histoire des variations du couvert végétal au Quaternaire, en fonction des changements climatiques, puis des débuts de l'agriculture à l'Holocène. Rappelons aussi que, récemment mise en évidence, la dénitrification qui s'effectue dans les sols des marais est une solution à un problème écologique et sani-

taire aigu. Quelques pionniers, puis des scientifiques de plus en plus nombreux ont démontré l'absurdité écologique et économique de la destruction des marais et des tourbières, et la nécessité de conserver ces écosystèmes précieux et fragiles. Depuis quelques décennies, leurs idées ont droit de cité, bien qu'il reste beaucoup à faire pour changer les mentalités des responsables politiques et économiques. On doit comprendre les processus de dégradation des marais et des tourbières, afin de mettre en œuvre les moyens de leur conservation. L'ouvrage en précise les procédures légales, les techniques de gestion conservatoire, souvent fondées sur les pratiques traditionnelles des sociétés rurales qui avaient su y réaliser empiriquement une gestion durable. Leur valorisation culturelle et éducative est un apport nouveau à leur connaissance, de plus en plus apprécié du public.

L'ouvrage s'achève par un guide des tourbières de France, Belgique, Luxembourg et Suisse (dans un ordre un peu déroutant, même s'il est écologiquement justifié) et par de nombreuses annexes (cycle du carbone dans les tourbières, dynamique de leur végétation, glossaire, terminologie, habitats et espèces d'intérêt prioritaire en Europe ou légalement protégés, bilan des mesures de protection, associations et organismes concernés, bibliographie classée, index géographiques...).

Rien ne manque : les responsables de notre environnement, décideurs et gestionnaires, mais aussi les enseignants, les étudiants et, enfin, le plus large public trouveront ici des informations quasi exhaustives sur les zones humides, sujet particulièrement sensible.

Marcel BOURNERIAS

Politique

Le principe de précaution. Rapport au Premier ministre

Philippe Kourilsky et Geneviève Viney. Éditions Odile Jacob et La Documentation française, 2000 (406 pages, 140 francs).

Le principe de précaution fait partie de ces bonnes intentions dont l'enfer est pavé. Devant un risque inconnu, mais potentiellement catastrophique et irréversible, la sagesse impose certes de ne pas le courir. Toutefois, ce principe est de plus en plus invoqué comme le remède miracle à l'indécision politique. C'est facile : on réunit une commission de scientifiques qui ne se prononce ni dans un sens ni dans l'autre. C'est pas cher : on instaure «par précaution» une réglementation qui limite la concentration de telle ou telle substance dans tel ou tel excipient, de préférence à la limite de la détectabilité, sinon au zéro absolu. Et, contrairement au Loto, on gagne à tous les coups, car la précaution a la propriété miraculeuse de s'autojustifier, comme l'avait bien compris le paysan de la blague :

— Père Mathieu, pourquoi mettez-vous des lions empaillés dans votre verger ?

— Pour faire peur aux girafes qui vendraient manger mes pommes.

— Mais, Père Mathieu, il n'y a pas de girafes en Normandie...

— Vous voyez : ça marche !

Une disposition de précaution est censée être une mesure d'attente, prise en l'absence, qu'il faut supposer provisoire, de certitudes scientifiques. Mais quel responsable a jamais osé dire : «Aujourd'hui, le doute est levé, on sait que cette substance est inoffensive, il faut annuler les mesures de précaution la concernant» ? La position prise en septembre 1995 par la Commission européenne à propos de la teneur limite en nitrates de l'eau de table en est un parfait exemple : après avoir constaté que «les études au long cours chez l'animal n'indiquent pas que les nitrates sont cancérigènes» et qu'en outre «les études épidémiologiques approfondies ont échoué dans leur démonstration d'une association avec un risque cancérigène chez l'homme», la Commission conclut «donc» (*therefore*, dans le texte original) au maintien de la norme établie en 1980 ! La précaution est malheureusement affectée d'un cliquet diabolique : les normes deviennent toujours plus sévères, car elles suivent le progrès des techniques

de détection de la substance incriminée, et non celui des connaissances sur le risque qu'elle est soupçonnée présenter.

On peut regretter que Philippe Kourilsky et Geneviève Viney n'aient pas été plus précis dans les recommandations de leur rapport au Premier ministre, publié sous le titre *Le principe de précaution* : «Ce principe, concluent-ils, doit être proportionné à l'ampleur du risque et peut être à tout moment révisé» ; il aurait mieux valu écrire «doit être révisé», sinon, à tout moment, du moins au fur et à mesure du progrès des connaissances sur le risque en question. C'est la seule faiblesse de ce livre, qui aborde le principe de précaution sous tous ses aspects : conceptuel, culturel, technique, politique, administratif, économique, juridique, social, médiatique et, bien sûr, scientifique. La richesse de la documentation en fait un ouvrage de référence pour le citoyen qui souhaite éclairer son jugement et pour tous les professionnels – chercheurs, experts, ingénieurs, industriels, juristes, journalistes, politiques, etc. – qui doivent prendre en compte ou mettre en œuvre la précaution. On y trouvera aussi, ce qui ne gâte rien, quelques anecdotes croustillantes sur les illogismes auxquels aboutissent des mesures fondées plus sur des considérations politiques que sur des faits scientifiquement avérés.

Jean-Jacques DUBY

Génétique

Tout ce que vous vouliez savoir sur la génétique

Martin Brookes. Éditions Le Pré aux clercs, 2000 (192 pages, 119 francs).

Il y a une dizaine d'années, les livres de vulgarisation de la biologie moléculaire déferlèrent. Il y en eut pour enfants, pour adultes, pour le public cultivé, pour le grand public, écrits par des chercheurs, par des journalistes, de bons, de mauvais, illustrés ou réduits à du texte. On n'y échappait pas : la biologie moléculaire naissait, et le public voulait comprendre de quoi il s'agissait.

Puis les notions de base furent introduites dans l'enseignement, notamment sous l'impulsion de Jean Tavlitzi, qui publia une bande dessinée scientifique afin de montrer aux enseignants les enjeux de la génétique. Le temps a passé, et les grands débats politiques et sociaux sont apparus : organismes génétiquement

SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-55-42-84-00
<http://www.pourlascience.com>

POUR LA SCIENCE Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Hervé This (Rédacteur en chef), Françoise Cinotti (Rédactrice en chef adjointe), Bénédicte Lederocq (Rédactrice en chef adjointe), Yann Esnault, Philippe Pajot, Loïc Mangin, Claire Le Poulenec (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction : Annie Tacquenet, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Site Internet : Cyril Lamotte. Marketing et Publicité : Stéphane Montouchet, assisté de Séverine Merviel et Christophe Vitiello. Direction financière : Anne Gusdorf. Direction du personnel : Jean-Benoît Boutry. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Géraldine Le Coz. Presse et communication : Sylvie Gillet, assistée de Lucie Romier. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Leïla Bellon, Paul Decaix, Charles Frankel, Richard Heidmann, Évelyne Host-Platret, Marie-Thérèse Landousy, Claude Olivier, James Orr, Guy Paulus, Christophe Pichon, Elisabeth Rosnet, Alain Souchier, Jean-Philippe Uzan, Jean-Louis Valab.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor: John Rennie. Board of editors: Michelle Press, Mark Alpert, Timothy Beardsley, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Alden Hayashi, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Ricki Rusting, Sarah Simpson, Gary Stix, Philip Yam, Glenn Zorpette. Chairman Emeritus: John Hanley. Chairman: Rolf Grisebach. President and Chief Executive Officer: Joachim Rossler. Vice-President: Frances Newburg.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Jean-François Guillotin,
jf.guillotin@pourlascience.fr

8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06

Tél. : 01 55 42 84 28

Télécopieur : 01 43 25 18 29

Étranger : 415 Madison Avenue, New York.
N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS

Anne-Claire Ternois : 01 55 42 84 04

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Christophe Vitiello : 01 55 42 84 81.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE

POUR LA SCIENCE

Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.

Suisse : Servidis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis

Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oyes - 1130 Bruxelles.

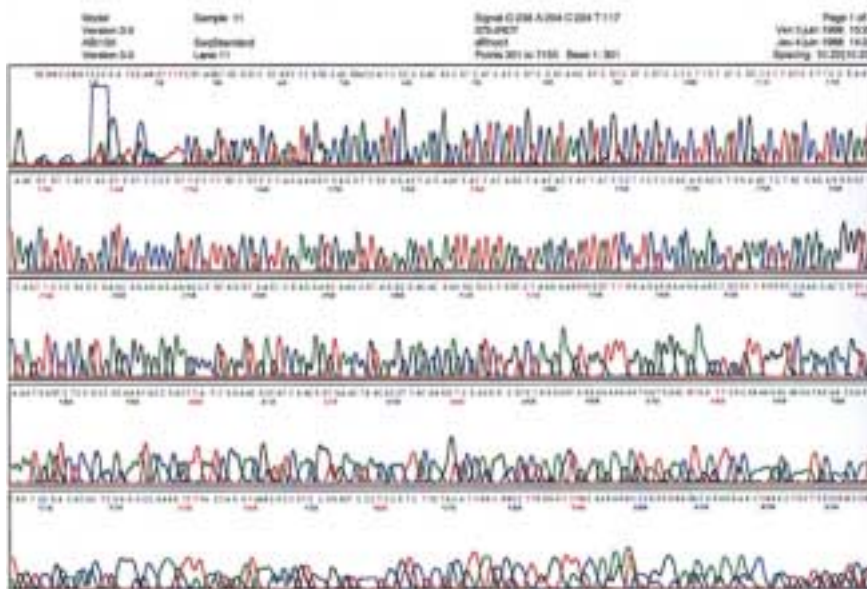
Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.» En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins - 75006 Paris).

Nos lecteurs trouveront des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 98A et 98B.



Résultat d'une électrophorèse utilisée à des fins de séquençage.

modifiés, transgénèse, clonage... Le public a-t-il oublié ? S'est-il renouvelé ? Le vocabulaire scientifique a-t-il évolué ? En tout cas, la perspective de la nécessaire vulgarisation de la biologie moléculaire a changé, et *Tout ce que vous vouliez savoir sur la génétique*, représentatif d'une nouvelle vague d'ouvrages de vulgarisation, révèle bien les nouvelles préoccupations.

Bien sûr, on y trouve encore l'explication de l'ADN, de l'expression des protéines, des exons et des introns... Mais les têtes de paragraphe sont éloquentes. «mutations néfastes», «maladies génétiques», «des raisons de s'inquiéter», «aliments contre nature» forment un premier groupe, qui exprime des peurs et examine leurs fondements. À côté de ce groupe, un autre est plus technique : «des ciseaux moléculaires», «PCR et amorces» introduisent les notions modernes, présentent les découvertes les plus récentes. Enfin, en début de livre, «le cou de la girafe», «microscopes», «xx ou xy» et d'autres font une brève histoire de la génétique.

Au total, le livre oscille entre examen des peurs, enseignement technique, présentation historique, discussion éthique. Martin Brookes est un zoologiste qui se consacre aujourd'hui à la vulgarisation scientifique. Est-ce ce recul qui lui permet de regarder la génétique et la biologie moléculaire de cette façon si critique ? Pas de triomphalisme, en effet, dans ses lignes consacrées au clonage, par exemple. Ni au traitement du cancer ou des maladies génétiques, telle la mucoviscidose. L'auteur cherche à rester aussi factuel que possible («Le projet sur le génome humain est l'une des entreprises scientifiques les plus audacieuses depuis la conquête de l'espace. Son objectif est de dresser la carte des quelque 100 000 gènes de nos 23 paires de chromosomes. Cela implique d'établir la

séquence complète des «lettres» du génome humain»), mais son point de vue surgit parfois, d'autant plus net qu'il tranche sur la neutralité du reste du propos : «Le séquençage du génome humain a été entrepris pour des raisons financières et dans un but scientifique. Des chercheurs et des sociétés de biotechnologie voudraient faire breveter les gènes, en particulier ceux qui sont responsables de maladies. Ces derniers ont une grande importance médicale et représentent potentiellement des sources de profits énormes pour les sociétés et les scientifiques. Mais l'idée de posséder des droits sur une séquence d'ADN est choquante. Les scientifiques n'ont pas inventé les gènes, ils n'ont fait que les découvrir.»

En pratique, le livre est imprimé sur du papier brun assez fort, rustique, avec une typographie variée, désordonnée même, et l'utilisation fréquente de caractères de machine à écrire : un choix qui voudrait montrer au lecteur qu'il ne s'embarquera pas dans des considérations ésotériques ? Dans le livre, pas de texte long, mais de petits paragraphes (jusqu'à huit par double page), illustrés de gravures ou de dessins anciens, détournés de leur fonction initiale (par exemple, une femme passant le balai, reprise d'un catalogue d'arts ménagers, est accompagnée d'une légende qui évoque les «déchets génétiques» qui accompagnent les gènes, dans l'ADN). Quant au titre, il est évidemment trompeur, mais laissons-nous appâter. Cette courte lecture est salutaire.

Gilles MARTZKI

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>