

LES ANTIBIOTIQUES
INEFFICACES ?

■ POUR LA

SCIENCE

édition française de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**



NIÉPCE l'invention de
la photographie

Canada \$ 3.75

Bloc-notes de Didier Nordon

Tribune des lecteurs

Jeu-concours

Le meilleur point de vue de Saturne

par Pierre Tougne

Point de vue

Les migrations internationales

par Hervé Le Bras

Les inattendus de la science

Les inattendus de l'informatique

par Jean-Marie Souriau



Présence de l'histoire

Les inventions insolites d'Edison

par Neil Baldwin

Science et gastronomie

La mousse des sabayons

Science et finance

Les mathématiques introduites en Bourse

par Christian Walter

Perspectives scientifiques :

Les divas donnent le la

Des éponges à fibres optiques

Avortement régulateur

L'oiseau danseur

Le regard du scribe

Qu'est-ce qu'une planète?

Mammifères en danger

Les bâtisseurs de pyramides

Contre le paludisme

Les insectes judiciaires

Le prix immérité

Savoir technique

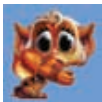
La neige artificielle



Visions mathématiques

Les carrés alphamagiques

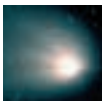
par Ian Stewart



Logique et calcul

Créatures

par Christoph Pöppe



L'expérience du mois

Une comète par la queue

par Shawn Carlson



Analyses de livres

– *Les poètes et l'Univers*, sous la direction de Jean-Pierre Luminet

– *L'alchimie*, par Andrea Aromatico

– *L'énergie et la matière*

– *Les illustrations entomologiques*, par J. d'Aguilar, R. Courtin, A. Fraval, R. Guilbot et C. Villemant

L'invention retrouvée de la photographie

par Jean-Louis Marignier
et Michel Ellenberger

La reconstitution expérimentale des procédés de Niépce fondée sur l'interprétation de ses lettres dévoile le génie «édisonien» de l'inventeur de la photographie.



Le deutérium primordial

par Craig Hogan

Les noyaux de cette forme d'hydrogène furent créés dans les premiers instants de l'Univers. La détermination de sa quantité confirme l'existence de matière noire exotique.



La menace permanente des armes biologiques

par Leonard Cole

Les États et les terroristes fourbissent aujourd'hui des armes biologiques. Des contrôles plus stricts devront les dissuader de les utiliser.



Les nanomatériaux

par Richard Siegel

Des solides composés de grains très fins sont plus durs, plus malléables ou plus transparents que les matériaux habituels.

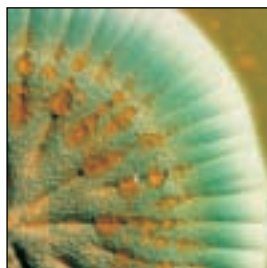


La résistance des bactéries aux antibiotiques

66

par Antoine Andremont,
Denis Corpet
et Patrice Courvalin

Les antibiotiques sauvent des millions de vies. Toutefois, ils favorisent la sélection de bactéries résistant aux antibiotiques.



Poussières atmosphériques et pluies acides

74

par Lars Hedin
et Gene Likens

Pourquoi les pluies restent-elles acides, alors que les réglementations réduisent les pollutions industrielles? Les poussières atmosphériques semblent être en cause.

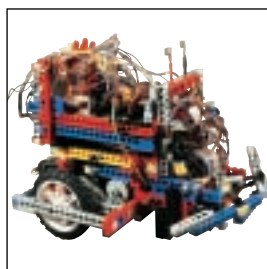


Un grillon robot

80

par Barbara Webb

Un système électromécanique simple imite le comportement d'une créature vivante.



La vie quotidienne dans l'Égypte ancienne

86

par Andrea McDowell

Des écrits provenant de Deir el-Medina décrivent le niveau d'instruction exceptionnel des ouvriers-artisans qui y vivaient, il y a 3 000 ans.



Fleming et Niépce confirmés

Le marchand de canons Krupp montrait, chaque année, un canon qui transperçait ses blindages et, l'année suivante, une cuirasse qui résistait à l'impact des obus de ce canon.

Cette lutte entre l'épée et le bouclier est d'essence naturelle. Sous la pression de sélection des antibiotiques, des bactéries pathogènes mutantes sont sélectionnées : celles qui résistent prolifèrent. Le phénomène avait été pressenti par Fleming, l'inventeur des antibiotiques, mais qui écoute Cassandra? Plus grave encore, les bactéries résistantes envahissent, chez les malades, des zones où les bactéries anodines ont été éliminées par l'action des antibiotiques.

L'apparition et la transmission des résistances sont aujourd'hui mieux comprises (voir *La résistance des bactéries aux antibiotiques*, page 66), ce qui oriente les recherches pour augmenter l'efficacité des antibiotiques. Toutefois le problème de santé publique subsiste : pour éviter la prolifération des bactéries résistantes, il n'est pas d'autre solution, à terme, que le discernement dans les prescriptions.

L'obstination est une caractéristique du chercheur. Niépce avait l'obstination géniale. Après combien d'essais infructueux a-t-il eu l'idée d'utiliser, comme substance photosensible, le bitume de Judée? Après combien de vaines tentatives a-t-il déterminé les concentrations adéquates? Par quel éclair a-t-il perçu que le développement de l'image latente était une seconde étape nécessaire? Le terme de révélation photographique, utilisé par Nicéphore, est... révélateur. Il a fallu tout autant de persévérance à Jean-Louis Marignier (voir *L'invention retrouvée de la photographie*, page 36) pour retrouver les procédés de Niépce incompris depuis plus d'un siècle. Et il a fallu aussi longtemps pour expliquer, par la physico-chimie, les étapes de la photographie (voir *Les nanomatériaux*, page 58).

Le mystère du génie de Niépce reste entier, mais ses procédés photographiques sont, pour notre plus grande admiration, enfin dévoilés. Et, malheureusement, les craintes de Fleming sont vérifiées.

Philippe BOULANGER

Hérédité de l'accident

A en croire la vulgate darwinienne, l'homme descend du singe. Erreur : l'homme descend de l'accident.

Considérez n'importe quel être humain sur cette terre, et songez aux cent, aux mille, aux dix mille maillons de la chaîne qui, d'ascendant en ascendant, le relie à Adam et Ève. Il est absolument certain que, parmi ces innombrables aïeux, l'un au moins n'était pas désiré par ses parents et n'a vu le jour qu'à la suite de ce qu'on nomme un accident.

La solidité d'une chaîne est celle du maillon le plus faible. Pas un seul de nous ne vivrait si tous ses ancêtres s'étaient parfaitement contrôlés. Imaginez que les hommes, jamais, ne causent ni n'aient causé d'accidents : leur espèce serait depuis longtemps éteinte.

Le paranormal ignoré

Nous raillons volontiers le scientisme borné du XIX^e siècle. Or, selon B. Méheust, notre univers intellectuel est plus fermé que ne l'était celui du scientisme.

B. Méheust s'intéresse à l'attitude de l'institution scientifique vis-à-vis des phénomènes dits paranormaux – magnétisme animal, lucidité somnambulique, hyp-

nose... Au XIX^e siècle, écrit-il, les savants n'hésitaient pas à y aller voir. Même si leur rationalisme a pu les mener à une brutale intransigeance, ils ont au moins pris la peine d'examiner ces phénomènes dans des revues prestigieuses. Rien de tel aujourd'hui : il n'est pas de plus puissant tabou, dans le domaine de la connaissance, que l'interdit sur la métapsychique. «Pour faire court, l'intelligentsia a pardonné plus facilement à Heidegger d'avoir été nazi, qu'à Bergson, qui porta l'étoile jaune, d'avoir été (en 1913) président de la Society for Psychical Research.»

Aucun savant reconnu, aucune institution, n'accepte plus de débattre de l'étrange. Aussi assiste-t-on «à la prolifération incontrôlée d'une littérature bas de gamme constituée par les débris des recherches du XIX^e siècle, eux-mêmes recombinaés à une foule d'influences hétéroclites – fatras qui n'a plus grand-chose à voir avec la haute tenue des publications magnéto-hypnotiques de cette période».

Selon B. Méheust, le problème de la réalité des phénomènes paranormaux n'a pas été réglé par la négative. Il est en suspens, car ce n'est plus convenable de le poser. Méheust ne nie pas que les recherches sur le paranormal soient difficiles, qu'elles puissent être une poursuite de chimères, qu'elles constituent un défi pour la rationalité. Mais ces difficul-

tés ne devraient-elles pas être une raison de plus pour oser affronter le problème? (Bertrand Méheust, *Épistémologiquement correct*, Alliage, n° 28.)

Ultima ratio

S i un phénomène semble intemporel, c'est bien la mort. Pourtant non : sa définition change avec l'époque. Dans l'Antiquité, l'arrêt du souffle ou celui du cœur la caractérisent. De nos jours, la notion de mort cérébrale s'est introduite – et encore subit-elle des variations d'un pays à l'autre pour des raisons éthiques, religieuses, culturelles. Si bien que Jocelyne Vaysse a cette formule curieuse : «Être mort au XX^e siècle paraît presque plus complexe que dans les siècles précédents.» (Jocelyne Vaysse, *Petit traité de médecine psychosomatique*, Les Empêcheurs de penser en rond, 1996, p. 94.)

Un espoir d'immortalité naît alors : rendons les conditions de la mort tellement complexes que personne ne parviendra à les réaliser ! Définissons le moment de la mort d'un organisme comme celui où les éléments de cet organisme cessent tout échange physico-chimique avec le reste de l'univers. Cela confère à chacun de nous une espérance de vie égale à celle de l'univers. Il n'y a en effet aucune raison que ces échanges s'arrêtent avant lui : tant qu'il est là, rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme. Ce n'est pas encore l'immortalité, mais c'est un sur-sis inespéré. Suffira-t-il à diminuer notre angoisse devant la mort ? Qui vivra verra...

Étymologie préhistorique

L'affaire se passe au XVII^e siècle, à Düsseldorf. Le vicaire et organiste de Saint-Martin, Joachim Neumann, est compositeur. Selon la mode de l'époque, il transcrit son patronyme dans une langue classique, en l'occurrence le grec. *Neu* (nouveau, en allemand) se traduit par *néos*, et *Mann* (homme) par *andros*. Notre musicien tente donc de s'immortaliser sous le nom hellénisé de Joachim Neander.

Son œuvre n'est finalement pas restée au répertoire. L'homme, toutefois, a suffisamment marqué ses ouailles pour qu'un vallon près de Düsseldorf porte son nom.

Et il a fallu que ce soit dans ce vallon-là que, deux siècles plus tard, soient découverts pour la première fois des restes d'un homme préhistorique promis à une célébrité mondiale. Cet homme parut incroyablement nouveau à l'époque puisqu'on n'en avait encore jamais vu ; cet homme nous paraît au contraire terriblement ancien, puisqu'il a disparu depuis des dizaines de milliers d'années et a été remplacé par l'homme moderne ; cet homme a reçu le nom du lieu où il a été trouvé. En un mot comme en cent, c'est l'«homme de Néandertal» (*Tal*, en allemand, signifie vallon). Ainsi, l'homme ancien gisait dans le vallon de l'homme nouveau. Embrassade rocambolesque entre l'histoire et la préhistoire ! Laquelle mène l'autre ? Joachim Neumann a-t-il finalement conquis son immortalité ?

L'épisode ci-dessus est raconté dans le livre (fort mal écrit) d'Erik Trinkaus et Pat Shipman, *Les hommes de Néandertal*, Seuil, 1996. Reste une question. Si Neumann s'appelait ainsi, c'est que l'ancêtre à l'origine de sa lignée a paru nouveau à ses contemporains. Nouveau, certes, mais en quoi ? Bon sang, mais c'est bien sûr : il a été le premier à supplanter l'homme de Néandertal ! Neumann descendait en droite ligne du premier homme moderne apparu sur cette terre ! La boucle est bouclée...

De bonnes œuvres

«O n a écrit plus de livres en ce siècle qu'en cinq mille ans.»

Encore une triste lamentation sur l'explosion de matière imprimée que notre époque détraquée ne peut maîtriser ?

Non. La phrase a été écrite par Tommaso Campanella (1568-1639) dans son ouvrage *La cité du soleil*, et il débordait d'enthousiasme. Témoin de l'essor des sciences, il voyait l'homme connaître un nouvel élan qui coïncidait avec une accélération de l'histoire (voir Paolo Rossi, *Les philosophes et les machines 1400-1700*, PUF, 1996).

La même promenade, qui sera un parcours de santé pour le jeune homme, tuera le vieillard...

Voir sans être vu

La vision sans interaction permise par la mécanique quantique (voir *Voir sans regarder*, par Paul Kwiat, Harald Weinfurter et Anton Zeilinger, *Pour la Science*, janvier 1996) résout un problème fondamental, ancien et douloureux, de la littérature de science-fiction, celui de l'homme invisible. Plusieurs critiques ont reproché à Herbert George Wells que, pour voir, l'homme invisible devait interagir avec la lumière et donc être au moins localement visible, ou bien aveugle.

Voici le grand Wells réhabilité. Avec l'équipement convenable, l'homme invisible peut voir sans être vu. C'est une simple affaire de technologie.

Gérard KLEIN, Paris

Le chien distingue les filles

Dans *L'erreur du Grand Inquisiteur* (voir *Pour la Science*, décembre 1996), Ian Stewart présente un amusant paradoxe. Vous vous rendez chez des amis qui ont deux enfants. Vous apercevez une fille, mais l'autre enfant vous est caché par un chien. Quelle est la probabilité qu'il s'agisse également d'une fille ?

Le premier raisonnement consiste à dire que vos amis ont au moins une fille : ils ont deux filles, ou une fille aînée et un garçon cadet, ou un garçon aîné et une fille cadette. La probabilité cherchée est $1/3$.

Le second raisonnement consiste à dénombrer quatre possibilités : ils ont deux filles, et l'aînée joue avec le chien ; ils ont deux filles et la cadette joue avec le chien ; ils ont une fille aînée et un garçon cadet qui joue avec le chien ; ils ont un garçon aîné qui joue avec le chien et une fille cadette. La probabilité que l'enfant caché soit une fille est alors $1/2$.

Il existe en fait deux situations différentes. Si vos amis vous apprennent par téléphone qu'ils ont au moins une fille, c'est le premier raisonnement qui est correct. Si vous allez chez vos amis et que vous voyez une fille, c'est le second : outre que vous savez qu'ils ont au moins une fille, le fait de rencontrer justement une fille augmente la probabilité qu'ils en aient deux.

Gérard LAVAL, Dijon

Limites et infini

Les difficultés soulevées par John Casti (voir *Peut-on dépasser les limites logiques de la science ?*, *Pour la Science*,

décembre 1996) sont liées à la complexité des problèmes abordés par la science. Le fait de ne pas pouvoir déterminer la stabilité du Système solaire ne remet toutefois pas en cause la théorie de Newton : elle souligne simplement notre incapacité à résoudre des problèmes trop complexes, mettant en jeu un trop grand nombre de paramètres ou une trop grande précision dans l'observation. Pour y faire face, nous faisons intervenir l'infini dans nos raisonnements. Nous nous exposons alors aux théorèmes d'incomplétude, mais il n'y a là rien d'effrayant.

Les ensembles finis me font beaucoup plus peur que les ensembles infinis. Même si nous ne savons pas si l'Univers est fini ou non, nous ne prenons pas de grands risques en affirmant que l'ensemble des événements observables au cours d'une expérience ne dépend que d'un nombre fini de causes. Nous devrions donc être capables de répondre à toutes les questions en utilisant seulement des ensembles finis. Bien que cela soit aussi vrai du jeu d'échecs, personne n'a jamais trouvé de méthode pour gagner systématiquement. Les ensembles finis sont le royaume de la contingence et du hasard : nous pensons bien les comprendre mais, quand ils sont trop grands, nous n'en avons plus aucune intuition. Au contraire, les ensembles infinis, en particulier les ensembles continus, sont symétriques, homogènes et se prêtent facilement à l'abstraction. Bien sûr, pour les utiliser, nous devons renoncer à pouvoir tout découvrir.

Fabien BESNARD, Paris

Électrothérapie

Thierry Viéville écrit, à propos des appareillages de commande cérébrale des ordinateurs (voir *Des signaux nerveux pour commander les ordinateurs*, par Hugh Lusted et Benjamin Knapp, *Pour la Science*, décembre 1996) que les mêmes électrodes «ont servi à anéantir le cerveau de nombreux humains classés comme fous, avec ces trop célèbres électrochocs». En fait, aucune atteinte cérébrale n'a jamais été provoquée par cette technique seule, quand elle est réalisée dans des conditions correctes.

Les indications majeures des électrochocs, ou électroconvulsivothérapie, sont la dépression sévère résistante mettant en jeu le pronostic vital (c'est alors le traitement le plus efficace en prenant en compte les effets secondaires) et chez les patients fragiles ne supportant pas les thérapeutiques médicamenteuses. Il ne s'agit donc pas de

«fous» issus d'une quelconque «nef» du Moyen Âge.

Philippe GAILLARD, Tours

Réponse de Thierry Viéville

L'électroconvulsivothérapie n'a pas d'effets néfastes si elle est réalisée dans des conditions correctes : c'est le point fondamental. Cette pratique est délicate à réaliser et est réservée à des indications précises.

L'électroconvulsivothérapie d'aujourd'hui et les électrochocs pratiqués il y a plus de 20 ans sont deux techniques différentes. C'est de la seconde dont j'ai rappelé l'usage abusif et non spécifique, dans le passé et surtout aux États-Unis. Ces débordements sont révolus, mais on voit bien, à la protestation légitime de P. Gaillard, qu'ils entachent encore la réputation des bonnes techniques qui en sont issues. Ils ne sont pas le seul exemple de mauvaise utilisation d'une bonne technique : au début de la radiothérapie, on avait prescrit les rayons X comme «thérapie universelle», détruisant des organismes avant d'en faire le bon usage actuel.

Grand premier

Les nombres de Mersenne sont de la forme $2^n - 1$, où n est un entier naturel, et non $2^n + 1$ (voir *Brèves*, *Pour la Science*, janvier 1996). Si le nombre $2^n - 1$ est premier, alors n est lui-même premier, mais la réciproque n'est pas toujours vraie. Pour prendre un exemple simple, $2^{11} - 1$ n'est pas premier.

En outre, le nombre de Mersenne où n est égal à 1 398 269 s'écrit avec beaucoup plus de 400 chiffres. En effet, le nombre de Mersenne pour n égal à 3 217 s'écrit déjà avec 969 chiffres.

A. BERGER, Venelles

Le nombre de Mersenne pour n égal à 1 398 269 est bien le 35^e connu. Son rang dans la suite est peut-être plus grand : des tests systématiques n'ont été pratiqués que pour les nombres inférieurs à 559 000, et de nouveaux nombres de Mersenne pourraient s'insérer. En outre, $2^{1\,398\,269} - 1$ s'écrit avec 420 921 chiffres (soit un peu moins que le nombre de caractères que contient cette revue).

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 101641.3525@compuserve.com. Indiquez *Tribune* dans la

JEU-CONCOURS

N°32

PIERRE TOUGNE

LE MEILLEUR POINT DE VUE DE SATURNE

Comme chacun sait, la planète Saturne est entourée d'anneaux que les Saturniens ne se lassent pas

d'un seul anneau équatorial de rayons interne et externe r_1 et r_2 , avec $r < r_1 < r_2$.

Precisons de plus que, par souci d'élégance, le

d'observer... Évidemment plus ils voient de l'anneau, plus les Saturniens sont contents.

Saturnien préfère, et de loin, une solution géométrique.

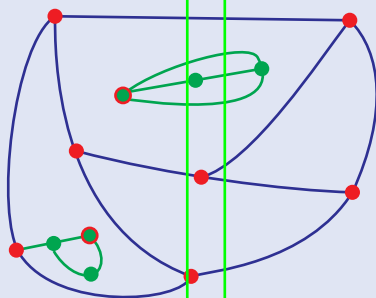
A quelle latitude doit se placer le Saturnien pour avoir le meilleur point de vue, c'est-à-dire voir l'anneau sous le plus grand angle possible, et quel est cet angle? Pour simplifier notre problème, nous supposons que Saturne est une sphère de rayon r entourée

Envoyez vos réponses aux questions sur carte postale à *Pour la Science*, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois de février 1997, dix gagnants tirés au sort recevront le livre *Les abeilles*, coll. Univers des Sciences.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N°30

Pour obtenir le nombre de coups maximum dans un jeu de couplage avec n points, il suffit de remarquer que chaque point de départ a trois possibilités de couplage, soit au total $3n$ possibilités. D'autre part, à chaque coup, on supprime deux possibilités de couplage avec l'arc joignant les deux points (ou le point à lui-même). En revanche, le point ajouté sur cet arc en acquiert une, soit au total une diminution des possibilités d'une unité. Quand le jeu s'arrête, le dernier point créé a encore une possibilité de couplage dont le nombre maximum de coups est $3n - 1$.

Le nombre minimum de coups est un peu plus délicat à obtenir.



Nous raisonnerons par récurrence. Désignons par C_{n-1} ce nombre pour $n - 1$ points. Le jeu étant terminé, il ne reste que des points ayant épuisé leurs possibilités de couplage ou des points ayant une possibilité de couplage, mais séparés par un arc infranchissable. Si l'on ajoute un point libre, soit il ne peut se coupler à aucun autre point et l'on n'aura que deux coups supplémentaires en le connectant à lui-même, soit on peut le coupler à un point ayant une possibilité de liaison, mais là encore le nouveau point créé ne pourra se coupler qu'au point ajouté et la partie sera encore terminée en deux coups. On a donc $C_n = C_{n-1} + 2$. Comme $C_1 = 2$, on montre facilement que $C_n = 2n$.

France Culture
et
Pour la Science

vous invitent
au Palais
de la Découverte
à l'enregistrement

des Inattendus
de la science

Samedi
8 février 1997
à 15h

L'apport inattendu
des fractales
avec Benoît Mandelbrot
l'inventeur des fractales,
mathématicien et professeur
à Yale

Invitations à demander
au 08 36 68 10 99 (2,23F/mn)



Palais de la découverte
SCIENCE

Les migrations

HERVÉ LE BRAS

Le monde politique reste rarement serein quand il évoque le problème des migrations internationales.

Dans *La grande migration*, l'essayiste allemand Hans-Magnus Enzensberger écrit : «Au lieu de guerres coloniales organisées étatique-ment, au lieu de campagnes de conquête et au lieu de déportations, on va sans doute assister à des migrations massives de caractère moléculaire» (c'est-à-dire analogues au mouvement des gaz, des hautes pressions vers les basses pressions). Tout indique aujourd'hui, au contraire, que les migrations prochaines seront moins massives que celles de la fin du XIX^e siècle ou des années 1960 et qu'elles suivront des processus politiques et économiques subtils et différenciés.

L'émoi suscité par les migrations tient en grande partie à la complexité des mouvements actuels : des tendances anciennes, en voie de résorption, vagues migratoires et liens coloniaux, coexistent avec des tendances nouvelles, drainage des cerveaux, mobilité des populations industrialisées et réfugiés de guerres civiles. Passons en revue ces divers flux.

Depuis deux siècles, les migrations se déroulent selon un schéma assez uniforme : des individus partent d'abord seuls pour travailler à l'étranger ; puis, à mesure qu'ils s'intègrent à l'économie du pays d'arrivée, ils font venir leur famille, montent dans l'échelle sociale et perdent finalement le contact avec leur pays d'origine. Cette histoire fut celle des Italiens et des Belges qui s'installèrent en France au début du siècle, puis des Polonais importés par le patronat durant l'entre-deux-guerres ; elle se produit aujourd'hui pour les Algériens arrivés en France il y a 30 ans (ils sont passés de 805 000 en 1982 à 650 000 en 1990) ou pour les Italiens en Suisse (405 000 en 1983, 365 000 en 1993).

La vague s'étale aussi dans l'espace. Alors que les migrants venus d'un pays donné se concentrent d'abord dans un seul pays d'arrivée et dans quelques métiers, ils diffusent ensuite, progressivement dans les pays voisins et vers des métiers autres.

Les migrations empruntent la voie de contacts habituels, entre pays frontaliers et au sein des empires coloniaux. Ainsi Marocains, Algériens et Tunisiens sont-ils deux fois plus nombreux en France que dans le reste de l'Europe (1,4 million et 0,7 million respectivement ; les

Indiens sont majoritairement installés en Grande-Bretagne, les Indonésiens aux Pays-Bas, etc. Cette observation contredit sérieusement une théorie moléculaire de la migration.

Les vagues migratoires qui viennent d'être citées ont déjà culminé et semblent devoir décliner dans les prochaines années. En revanche, un régime traditionnel de migration se prolongera en provenance de l'Afrique subsaharienne, car la vague a commencé récemment.

VAGUES OU VAGUELETTES?

Les migrants sont aujourd'hui bien moins nombreux qu'au début du siècle, en valeur absolue comme en proportion. En 1907, 1,3 million de personnes entrèrent légalement aux États-Unis ; de 1900 à 1915, la moyenne annuelle des entrées fut de un pour cent de la population totale, tandis qu'elle ne dépasse pas 0,3 pour cent pour la dernière dizaine d'années. De même, une proportion considérable de la population quittait les pays d'émigration : 1,4 pour cent de la population de l'Irlande quittait le pays chaque année entre 1871 et 1901, et 2,1 pour cent des Italiens s'expatriaient entre 1906 et 1914. Si la migration des Indiens ou des Chinois était aujourd'hui identique, plus de 40 millions d'immigrants gagneraient annuellement les pays industrialisés.

En 1960, à la création du Haut-Commissariat des Nations unies pour les réfugiés, ces derniers étaient 1,5 million ; ils sont estimés à plus de 20 millions en 1994. À ce rythme, ils pourraient constituer la majorité des résidents étrangers dans le monde, au cours des prochaines années. Les réfugiés sont des gens pauvres qui ne peuvent pas fuir très loin des frontières de leur pays. Quand ils parviennent à gagner les pays industrialisés, leur sécurité n'est pas acquise pour autant, car l'augmentation rapide du nombre des demandes de droit d'asile a suscité un changement de législation dans la plupart des pays industrialisés.

Ceux-ci ne paraissent d'ailleurs pas menacés par l'afflux des réfugiés : plusieurs experts avaient prévu des dizaines de millions de réfugiés en provenance de l'Est, après l'effondrement des régimes communistes, mais les mouvements ont été 10 ou 20 fois inférieurs aux prévisions, et ont principalement concerné

les Allemands «ethniques», vivant encore dans ces pays. La migration entre pays industrialisés et le drainage des cerveaux seront probablement le principal phénomène migratoire futur. La mondialisation des échanges de marchandises entraîne, dans son sillage, la mondialisation de nombreuses professions. Déjà, près de 1,5 million de Français et plus de 5 millions d'Américains vivent en permanence en dehors de leur pays natal ; en passant de 83 000 à 110 000 entre 1983 et 1993, les Américains sont devenus la troisième nationalité étrangère en Grande-Bretagne. D'autre part, les personnes en provenance des pays en développement ont une qualification de plus en plus élevée : de plus en plus d'étudiants venus du Sud restent dans les pays du Nord, où ils ont fait leurs études.

Il est devenu courant de parler d'évolution économique «en sablier» dans les pays occidentaux, pour signifier que les personnes à très bas revenu et à très haut revenu deviennent de plus en plus nombreuses, tandis que les classes moyennes s'effritent. On peut étendre le constat aux migrations. Durant les deux derniers siècles, ce sont des classes moyennes qui ont émigré pour parer la descente sociale qui les menaçait dans leur pays d'origine. Arrivées pauvres dans les pays neufs ou en France, elles ont pris une «revanche sociale» en s'élevant dans la société d'accueil.

Désormais, au contraire, ce sont les classes les plus riches et les plus pauvres qui se déplacent. Les plus riches se trouvent partout chez eux, selon la devise des hôtels Sheraton. Les plus pauvres ne peuvent franchir que quelques dizaines de kilomètres avant de s'entasser dans des camps de réfugiés à la frontière d'un pays où leur vie a été mise en danger. Ce changement de nature des migrations tient au bouleversement du marché du travail : les mécanismes d'ascension sociale sont devenus plus longs et plus sélectifs dans les pays industrialisés. Pour les classes moyennes des pays en développement, il devient plus rentable de tenter sa chance sur place que d'émigrer.

Hervé LE BRAS est directeur du Laboratoire de démographie historique à l'École des hautes études en sciences sociales.

Rapport SOPEMI, Paris, OCDE, 1995.

H. M. ENZENSBERGER, *La grande migration*, Gallimard, 1995.

***Population migration and the changing world order*, sous la direction de W. T. S. Gould et A. M. Finlay, Academic Press, 1994.**

Les inattendus de l'informatique

JEAN-MARIE SOURIAU

Il est surprenant que l'informatique nous ait permis de mieux connaître nos propres processus de réflexion et d'apprentissage. Le dialogue homme-ordinateur augmente les possibilités de l'ordinateur et améliore l'analyse de nos facultés cognitives.

En informatique, l'inattendu est la règle, la prévision exacte, l'exception. D'abord pour ce qui est des possibilités. Les ingénieurs pensaient, dans les années 1960, que les circuits intégrés ne fonctionneraient jamais, car les transistors n'étaient pas assez fiables individuellement pour être groupés par milliers sans panne générale. Cette impossibilité a été balayée en quelques années par les progrès de la technique.

Ensuite pour ce qui est des besoins. Les industriels de l'informatique pensaient que deux ou trois calculateurs de l'époque, de la puissance d'un micro-ordinateur actuel, suffiraient à l'ensemble des scientifiques. Depuis on a multiplié par des milliards la puissance de calcul nécessaire à l'industrie et la recherche.

Enfin, pour ce qui concerne les utilisations. Nul prévisionniste n'a prévu l'expansion des micro-ordinateurs, comme machine à écrire intelligente et comme support de jeu. Parallèlement, aucun mathématicien ne pensait que l'ordinateur lui apporterait une aide importante : en 1976, apparaissait la première preuve par ordinateur, et l'informatique aide aujourd'hui le mathématicien pour les routines calculatoires et l'examen systématique et exhaustif des configurations.

LE NUCLÉAIRE ET L'INFORMATIQUE

En cette fin de siècle, propice aux bilans, une conclusion s'impose : l'industrie nucléaire et l'informatique sont les grandes industries du siècle. Le développement de la première était entièrement prévisible, l'expansion de la seconde totalement imprévue.

L'expérience de Becquerel et les travaux de ses continuateurs prouvaient

l'existence d'une énergie inattendue à l'intérieur des atomes, énergie que les physiciens ont maîtrisée puis exploitée. La formule d'équivalence $E = mc^2$, les expériences de Rutherford et des Curie sur les atomes, la découverte par Frédéric Joliot-Curie de la radioactivité artificielle, ont placé les physiciens, puis les ingénieurs, sur les rails du développement de l'industrie nucléaire, militaire et civile : le projet Manhattan a été mené à bien dans les délais, et l'aboutissement était prévu. Cette prévisibilité est mesurée par la science-fiction, un excellent thermomètre de l'imagination. Parmi les ouvrages de science-fiction des années 1930, un livre s'appelait *On va faire sauter Paris* : il décrivait assez précisément la bombe atomique. Au contraire, dans les œuvres de science-fiction des années d'après-guerre toutes les anticipations du calcul de l'ordinateur sont ridiculement timorées. La science-fiction fantasmait sur la robotique, sur des machines imitant l'homme ; aucune œuvre ne décrivait l'ordinateur portable et ses fonctions.

LES BALBUTIEMENTS DE L'INFORMATIQUE

Les travaux des pères fondateurs de l'informatique datent d'avant-guerre. Le mathématicien anglais Turing fut l'un des précurseurs. Dans les années 1936, il imagine une machine « virtuelle » qui lui permet d'établir des concepts importants et de poser les questions fondamentales, la notion de calculabilité par exemple : qu'est-ce qui est calculable, qu'est-ce qui ne l'est pas ? Un autre mathématicien John von Neumann pense, dans les années 1940, l'architecture des ordinateurs modernes. L'informatique pratique naît pendant la guerre, imposée par des

nécessités de calcul scientifique sur les réactions nucléaires.

Dans les années 1946-1948, j'étais ingénieur dans un grand organisme de recherche et le centre de calcul scientifique était un bureau où travaillait une dizaine de personnes, chacune d'elles munie d'une machine à calculer à manivelle, genre machine de Pascal améliorée. Pour faire une multiplication par 748, il fallait donner sept coups de manivelle, déplacer le chariot, faire quatre tours, déplacer le chariot, et enfin donner huit tours de manivelle. Cela prenait 15 à 30 secondes. On se rendait bien compte qu'il fallait automatiser ce calcul, notamment la rotation de la manivelle.

Aux États-Unis, les premiers ordinateurs incorporent ces automatismes, mais, pour réaliser un programme, il fallait relier les éléments avec des fils de câblage, comme dans les centraux téléphoniques de l'ancien temps. J'ai assisté à une démonstration qui se passait place Vendôme, au siège d'IBM. En un quart d'heure, le démonstrateur a déterminé les solutions d'une équation du troisième degré avec six décimales exactes. La fabrication avait demandé au programmeur une bonne semaine de travail de branchement.

On a réussi ensuite des programmations moins astreignantes à l'aide de cartes perforées où les trous symbolisaient les branchements : un programme était un paquet de cartes perforées semblable aux programmes musicaux des orgues de barbarie ou les cartes des métiers à tisser. Un progrès notable a été de s'affranchir du support papier pour transmettre les instructions. Parallèlement le microprocesseur a permis la miniaturisation et avec elle la puissance de calcul, la vitesse d'exécution et la diminution des coûts. Toutefois l'architecture d'un ordinateur actuel, à part quelques petits détails importants techniquement, mais secondaires conceptuellement, n'a pas évolué par rapport à l'Eniac, le premier ordinateur à tubes électroniques.

LA PUISSANCE : UN CHANGEMENT QUALITATIF

Ce que n'ont pas vu la plupart des décideurs, c'est que l'augmentation de la puissance de calcul permettait des actions spectaculaires. Les décideurs politiques français ont été particulièrement aveugles car ils ne connaissaient rien à la technique et se réfugiaient dans les idées générales. Quand les décisions concernant une nouvelle technique sont prises par des personnes incompétentes, il est clair qu'ils visent mal. Les décisions prises ont un semblant de logique, mais les prévisions passent à côté de toutes les cibles

par méconnaissance des possibilités d'innovation. Quel énarque aurait pensé aux traitements des images par l'informatique ?

Les machines actuelles multimédia fonctionnent parce qu'un ordinateur peut calculer 50 millions de cosinus par seconde et ainsi calculer une image avec tous les éclairages et la puissance du traitement est telle qu'on ne distingue plus les images virtuelles des images réelles. Actuellement, aux États-Unis, on vend autant d'ordinateurs que de téléviseurs, ce qui montre la concurrence du virtuel calculé et du réel.

Il y a eu d'autres effets inattendus de la révolution informatique. Ainsi l'horlogerie. Il y a 25 ans les professionnels pensaient : « Il n'est pas possible de réaliser des petites montres-bracelets autrement que par les dispositifs traditionnels, les montres en mécanique à échappement ». La disparition partielle du métier d'horloger était complètement inattendue dix ans avant qu'elle se produise. Des quantités de métiers disparaissent ou sont profondément modifiés par l'emploi d'un microprocesseur. Même la musique : le terme de musique techno est significatif. Il est assez ridicule de dire c'est bien ou c'est mal. Nous vivons une révolution : l'essentiel est de la comprendre.

LE MATHÉMATICIEN ET L'INFORMATICIEN

Les scientifiques étaient-ils armés pour prévoir ce qui allait se passer ? Les mathématiciens, qui auraient dû être intéressés au premier chef, n'ont rien vu venir, à part quelques exceptions. Ils ne voulaient pas entendre parler de ces machines calculantes. J'ai des amis, mathématiciens

de très haut niveau, qui n'ont jamais touché un ordinateur autrement que pour faire du traitement de texte. Pour eux, l'utilisation de l'informatique était une humiliation. Pourquoi ? Peut-être parce que les mathématiciens se préoccupent essentiellement de l'infini et que l'ordinateur, pensaient-ils, ne fera jamais qu'un calcul fini. Il se trouve toutefois qu'entre les pratiques des mathématiciens concernant l'infini et les algorithmes des informaticiens, les liens sont plus profonds qu'on ne pouvait le croire.

Avec un calcul fini, un algorithme, Euclide a démontré qu'il y a un nombre infini de nombres premiers. Euclide suppose qu'il existe un plus grand nombre premier p . Il construit alors le produit des nombres premiers inférieurs à p auquel il ajoute 1. Ce nombre est soit premier, et alors plus grand que p , ou est divisible par un nombre premier supérieur à p . Donc pour tout nombre premier, il en existe un qui est plus grand et le mathématicien tout réjoui énonce : l'ensemble des nombres premiers est infini. Avec un raisonnement court, fini, il est parvenu à un résultat infini. Cette stratégie s'appelle la récurrence ou plutôt, chez les informaticiens, la récursivité.

Pour passer du fini à l'infini, l'informaticien transforme une donnée en variable. Prenons un exemple tout à fait différent, le jeu des chiffres et des lettres. On donne des chiffres et six plaques sur lesquelles est écrit 50, 9, 3, 100, 25 et 4 ; avec les quatre opérations, l'addition, la soustraction, la multiplication et la division quand elle tombe juste, il faut obtenir un certain résultat, ici 531. Peut-on écrire un programme informatique qui résolve ce problème ? Nous souhaitons

traiter ce problème par récursivité, mais récursivité sur quoi ? Rien ne bouge ! Alors là, il faut faire un acte de création, imaginer une règle infinie qui contiendra cette règle finie. On suppose tout simplement que le nombre des plaques est une variable dénommée p . Si nous savons résoudre le problème avec p plaques, nous saurons très bien résoudre le problème avec $p + 1$ plaques. Autrement dit, pour résoudre le problème à p plaques, il suffira de résoudre le problème à $p - 1$ plaques, pour résoudre le problème à $p - 1$ plaques, on examine le problème à $p - 2$ plaques, etc.

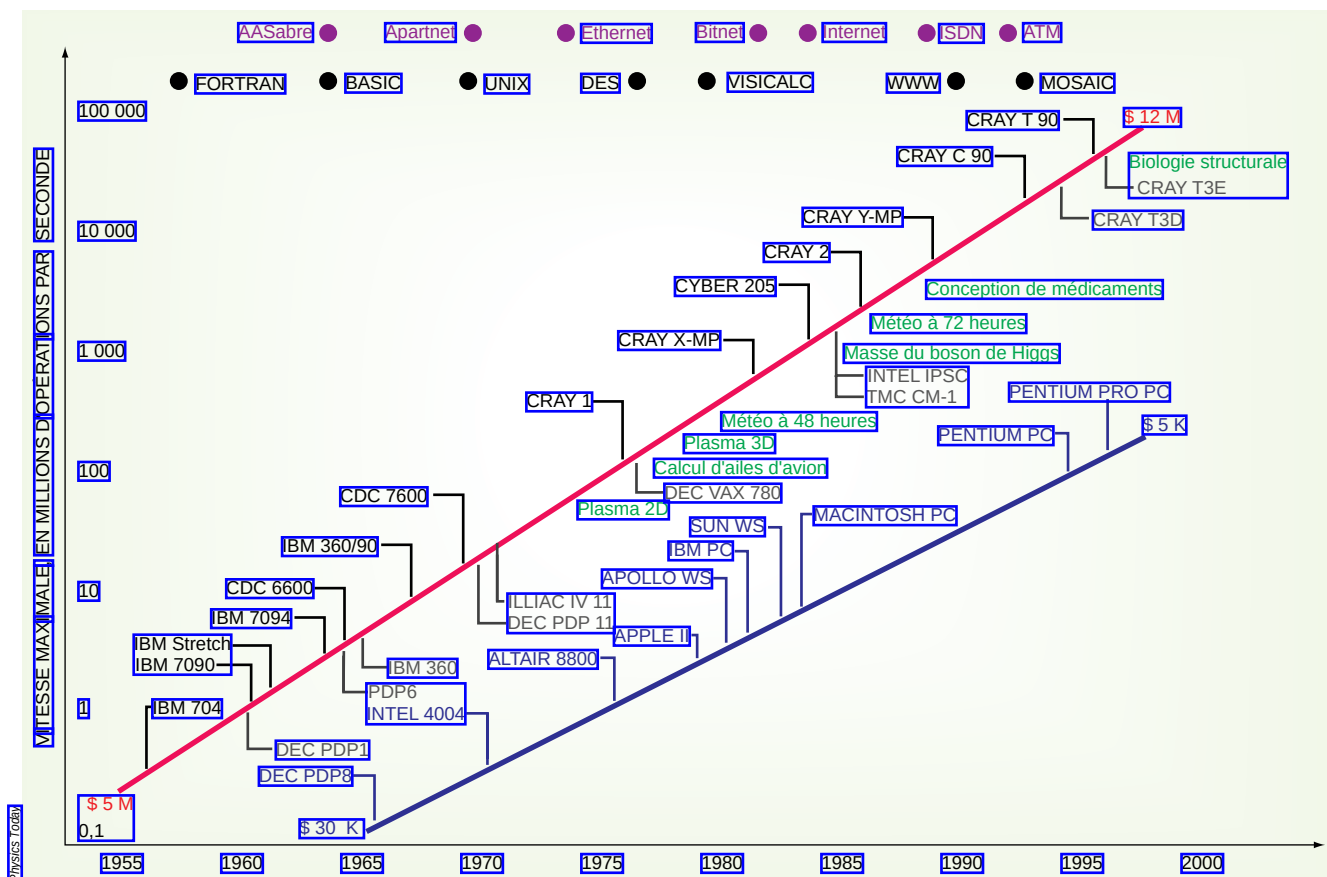
Autrement dit, dans le jeu des chiffres et des lettres, le programme prend deux plaques et il les remplace par une seule, mais cette plaque est une variable dont la valeur peut prendre tous les résultats des quatre opérations sur les couples de nombres des deux plaques. La démarche consiste ainsi à ramener le problème à p plaques à beaucoup de problèmes à $p - 1$ plaques. Et la machine continue ainsi en diminuant le nombre des plaques. Pour chaque opération, elle compare le résultat obtenu avec 531 et s'arrête quand elle a une coïncidence. Si elle n'a pas de coïncidence après avoir examiné toutes les possibilités, le problème est impossible.

Pour résoudre un problème fini d'informatique, la bonne méthode de programmation consiste à l'envisager comme un problème infini. Les mathématiciens ne se rendaient pas compte que les informaticiens adoptaient la même tactique qu'eux : transformer un nombre en une variable, ce qui revient à faire un détour vers l'infini. Quand on vous raconte la règle du jeu, vous entendez le nombre



Il dit que notre intelligence est réelle, et que la nôtre est artificielle...

Derrière tout grand homme, il y a un grand ordinateur...



Evolution de l'informatique depuis 1955. On a distingué les performances des grands ordinateurs et des ordinateurs personnels.

6, mais vous savez que ce n'est pas très important. Vous savez déjà que ce nombre pourrait être variable et la récursivité fait ainsi partie de notre pensée. La démarche utilisée est proche de celle d'Euclide pour démontrer qu'il y a un nombre infini de nombres premiers.

Dans l'exemple que je vous ai donné, la solution relativement difficile à trouver est la suivante : on commence par multiplier 50 par 100, on trouve 5 000, on ajoute 4, on obtient 5 004. On divise par 9, ce qui donne 556, et, ô merveille, 556 moins 25, est égal à 531, le résultat cherché.

LA MACHINE DÉVOILE NOTRE PENSÉE

Ce qui est inattendu, c'est que le dialogue homme-machine nous renseigne sur notre façon de penser. Et sur une nouvelle manière de concevoir certaines démonstrations de théorèmes. Ainsi, des mathématiciens ont utilisé l'informatique pour démontrer des théorèmes, le théorème des quatre couleurs par exemple. Alors l'aide de l'informatique est précieuse, si elle est bien employée. Il me semble que le mathématicien doit interroger lui-même la machine, c'est-à-dire programmer son problème, sans laisser ce soin

à d'autres. S'il laisse la programmation à un programmeur, il se crée deux espèces d'individus, les uns qui savent une chose et les autres qui en savent une autre, et c'est très dangereux pour l'avenir de l'humanité. Il est infiniment préférable et plus efficace que les scientifiques connaissent les deux approches pour les faire progresser en synergie.

D'autres progrès décisifs dans l'utilisation de l'informatique ont été les icônes et les fenêtres. On croit trop souvent que c'est Apple qui a inventé ces possibilités de conversation, en fait ce sont des ingénieurs de la Société Rank Xerox qui désiraient classer des documents. Les relations homme-machine s'amélioreront encore avec les machines à reconnaissance vocale et à reconnaissance de caractère. Personne n'avait prévu ces moyens de conversation : ils cachent à l'utilisateur le fait qu'il y a un calcul derrière.

La reconnaissance des caractères introduit de nouvelles techniques de programmation utilisant des réseaux de neurones. Dans cette technique, le programme doit être éduqué. Il demande à Monsieur Dupont, son acquéreur, d'écrire quelques phrases. Le programme examine cette information, et au bout d'un certain temps la machine sait lire l'écriture de M. Dupont. Jamais le programmeur

n'a dit : il y a des 0, des courbes fermées, des points sur les i . Il a dit à la machine, éduquez-vous vous-même et la façon dont elle s'éduque c'est son affaire, ce qui importe c'est qu'elle obtienne les résultats analogues aux nôtres. Nous réfléchissons sans savoir comment notre cerveau travaille, et ces programmes font de même. Nous ne savons pas, ni sous quelle forme, ni comment ils ont mémorisé l'information.

Des travaux de ce genre sont à l'origine de ce qu'on appelle les neurosciences, les sciences cognitives. Évidemment neurosciences, sciences cognitives, c'est un peu ronflant, et parfois le refuge des farfelus. Je pense néanmoins que c'est une discipline riche de promesses.

Les machines nous enseignent des aspects de notre propre pensée, et c'est cela qui était inattendu...

Jean-Marie SOURIAU est mathématicien, physicien et cosmologiste, professeur émérite à l'Université de Provence.

Ce texte est une transcription du débat enregistré, avec Émile Noël, au Palais de la Découverte. Ce débat sera diffusé sur France Culture le 5 février 1997, à 9h05.

Les inventions insolites d'Edison

NEIL BALDWIN

Le père du phonographe et de l'ampoule électrique a déposé plus de 1 000 brevets.

L'employé des chemins de fer de la gare de Saint Clemens, Mackenzie, raconte : «Le train manœuvrait. Il était allé prendre un wagon sur la voie de garage et lui avait donné une poussée suffisante pour que, tout seul, il rejoigne le fourgon sur la voie principale. [Edison], resté sur le quai, se retourna par hasard et vit mon petit Jimmy, inconscient du danger, qui jouait sur cette voie. Il jeta sa casquette ainsi que les journaux qu'il avait sous le bras, et se précipita au péril de sa vie pour sauver son petit ami. Ils plongèrent de la voie au moment où le wagon arrivait. On les

retrouva la figure incrustée de cailloux du ballast.» Pour le remercier, Mackenzie lui offre de lui apprendre la télégraphie. Peu après, Edison devient télégraphiste ambulant. Ces télégraphistes louaient leurs services au plus offrant, changeant d'emploi souvent sur un coup de tête. Plusieurs de ceux qui deviendront des capitaines d'industrie à la fin du XIX^e siècle commencèrent par être télégraphistes ambulants.

A Stratford Junction, Edison fait partie de l'équipe des télégraphistes de nuit. Comme il consacre ses journées à ses expériences, il s'arrange à prendre le maxi-

mum de repos pendant son service. Il lui faut s'affranchir du signal qu'il doit envoyer toutes les heures pour montrer qu'il est à son poste, bien éveillé. Il monte une roue à encoches sur un réveil et, à chaque heure, la roue établit les contacts nécessaires pour envoyer le signal.

Les inventions les plus célèbres d'Edison sont le phonographe, l'ampoule électrique et la caméra, mais cet inventeur a déposé plus de 1 000 brevets en 60 ans. Dépouvé de bases scientifiques solides, il a su s'entourer des meilleurs scientifiques et ingénieurs. Il remplit des centaines de cahiers de laboratoire, mais tous ses projets n'ont pas abouti. Il perdit notamment deux millions de dollars dans l'exploitation d'une carrière de minerai de fer : le minerai était broyé et coulait devant un aimant qui attirait le fer. Malheureusement, le prix du fer s'effondra après la découverte d'un minerai très riche, dans le Nord du Minnesota ; l'usine dut fermer, car son procédé d'extraction n'était plus rentable.

Inventeur infatigable, il était sans cesse en train d'imaginer de nouveaux procédés, et de cultiver ce qu'il nommait son «art». Il ne reconnaissait jamais qu'il s'était trompé, toujours poussé à aller de l'avant, sans se demander si son invention serait réalisable dans la pratique.

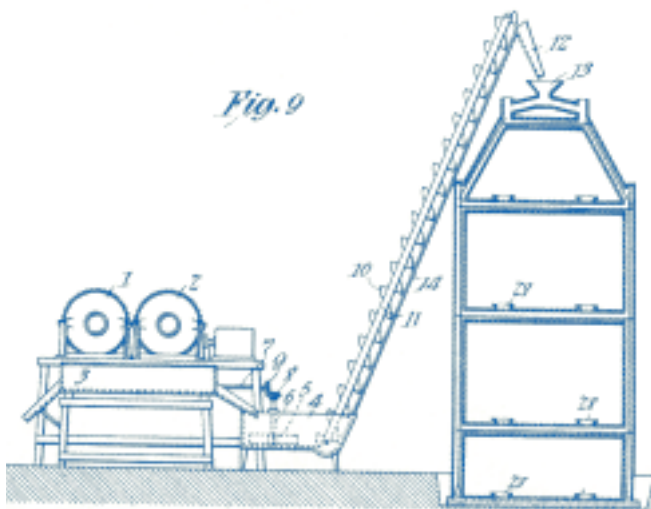
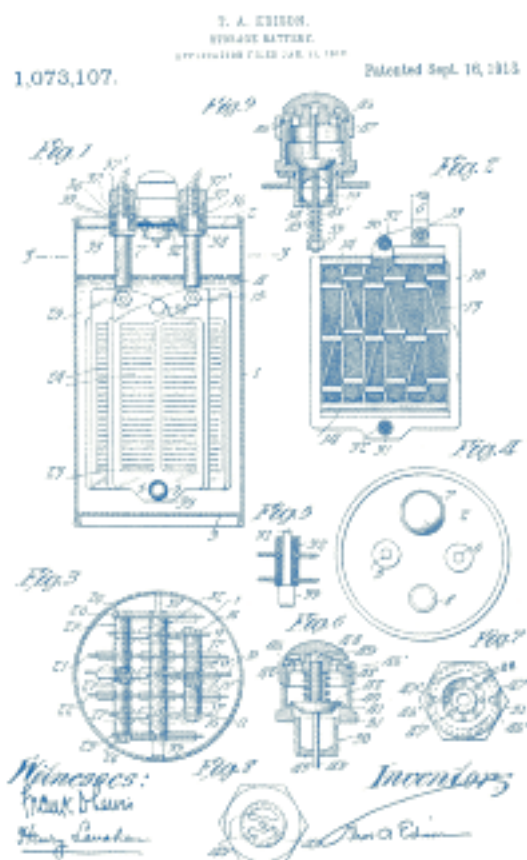


Au début de 1876, Edison (le sixième en partant de la gauche, avec un bonnet) veut fonder un laboratoire de recherche industrielle. Il découvre à Menlo Park, à 40 kilomètres de New York, un petit groupe de maisons au milieu des fermes et des champs. Edison achète la plus grande et fait construire un long bâtiment en bois à un étage pour le laboratoire, un atelier de mécanique et une petite menuise-

rie. Il y réunit des scientifiques de renom et, quatre ans après son ouverture, le laboratoire compte 200 personnes. Ce sera le berceau du phonographe et de la lampe à incandescence. Au deuxième étage du laboratoire principal, sont entreposées 2 500 bouteilles contenant des produits chimiques. Un orgue (au fond) est le point de rassemblement des chercheurs, après leur travail.

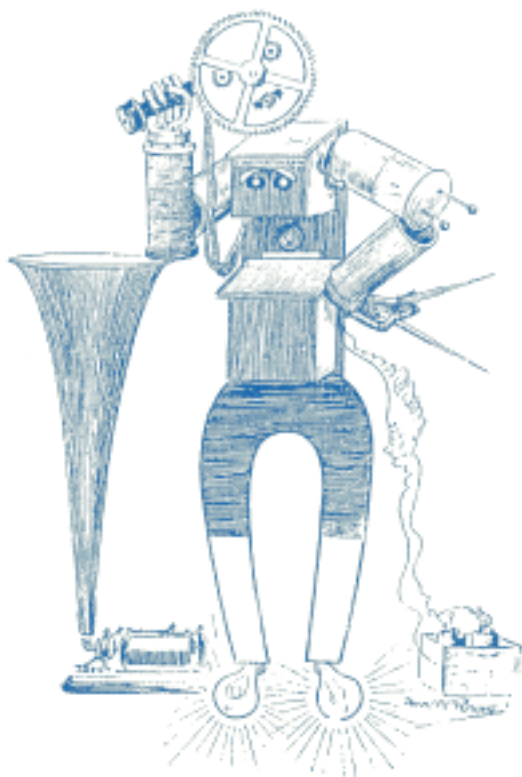


Conscient des menaces de pollution posées par l'industrialisation croissante, Edison déclare que «L'avenir appartient à la voiture électrique», bien que son ami Henry Ford ait notablement amélioré le moteur à combustion. Avec ses collègues, il met au point une batterie à accumulation : il remplace la solution d'acide sulfurique dans laquelle plongeaient les électrodes par une solution aqueuse. La batterie est rapidement rechargeable et représente une source d'énergie «propre». Cette voiture de la *Compagnie Bailey* datant de 1910 (ci-dessus) est équipée de la batterie d'Edison (schéma à droite). Le slogan publicitaire affirme que la voiture a une autonomie de près de 2 000 kilomètres grâce aux nouveaux accumulateurs d'Edison.



Edison imagine la maison en béton moulé. En août 1908, il dépose un brevet : «L'objet de mon invention est de réaliser un bâtiment de béton, en le coulant d'une seule pièce. L'ensemble – les murs, le toit, les cloisons, les planchers – constituera une seule masse. Le moule serait fait d'éléments en fonte, montés de façon à ménager le vide où serait coulé le ciment (ci-dessus). Pour augmenter la résistance, on noierait des fils métalliques, par endroits dans le ciment.» C'était la première fois que l'on préconisait l'emploi de béton armé aux États-Unis. Un fois le béton pris, le moule serait démonté, libérant la maison achevée (à droite, une maquette). Une maison fut effectivement construite. Six jours après avoir coulé le béton, on retira le moule. Il ne restait plus qu'à aménager portes et fenêtres et à installer la plomberie et l'éclairage. Pourtant, malgré la rapidité de construction et les propriétés isolantes du matériau, la maison en béton moulé n'obtint pas la faveur du public.





Edison (*en haut, à gauche*) était la cible des caricaturistes, qui l'ont représenté, vers 1890, sous le titre «Le magicien de Menlo Park» (*ci-contre*). Il était symbolisé par ses inventions les plus célèbres : le phonographe, l'ampoule électrique, un récepteur téléphonique amélioré et une caméra cinématographique. Parmi ses autres inventions, la poupée qui parle (*ci-dessus*) : on introduisait, dans la poupée, un cylindre de phonographe miniaturisé qui était actionné par une clé que l'on remontait dans le dos. L'usine produisait 500 poupées par jour. Les acheteurs avaient le choix entre plusieurs chansons enfantines, enregistrées par les ouvrières de l'usine. Le nouveau phonographe reproduisait fidèlement la voix humaine.

Neil BALDWIN dirige la Fondation américaine de littérature, à New York.

Ronald CLARK, *Edison, L'artisan de l'avenir*, éditions Belin, collection Un savant, une époque, 1986.

La mousse des sabayons

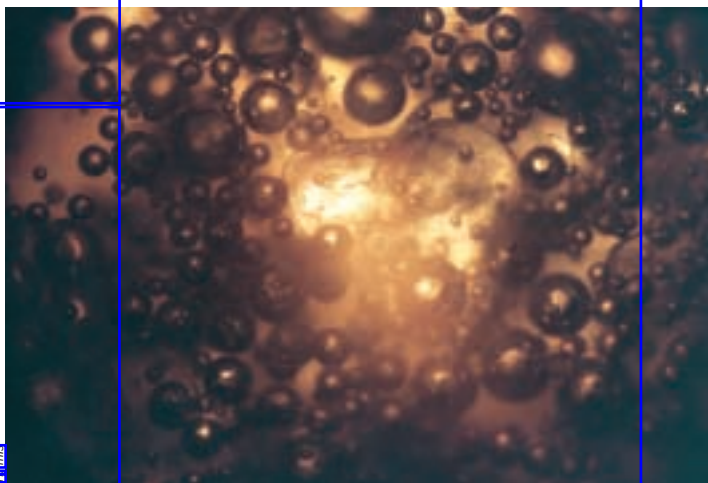
Elle est stabilisée par la coagulation de l'œuf.

Rêvons d'un sabayon parfait, idéal, platonicien. Comment doit-il être ? Dérivé du *zabaglione* italien, il s'obtient par le mélange de jaunes d'œufs et de sucre, que l'on fouette avant d'ajouter un vin doux ; en chauffant alors, tandis que l'on continue de fouetter, on observe que la préparation devient mousseuse, formant une sauce qui accompagne des fruits émincés ou qui se déguste dans de petites coupes, en guise de digestif. L'écueil est que la préparation ne mousse pas. La chimie et la physique peuvent-elles s'allier pour nous garantir le succès ?

Examinons d'abord une des innombrables recettes publiées : dans *La cuisine* (Éditions du tambourinaire), Marcelle Auclan indique : « 1 jaune d'œuf, 1/2 coquille d'œuf pleine de sucre, deux 1/2 coquilles d'œuf de vin (deux jaunes par personne). Et vous mettez votre futur sabayon à feu très doux, dans une casserole émaillée. Tournez, tournez... Tournez encore. Cela n'est pas très long, ni très sorcier, mais il faut du coup d'œil, et je ne sais quelle sensibilité qui vous fait sentir que le sabayon commence à prendre, devient onctueux. À partir de l'instant où, tournant toujours, vous avez le sentiment d'une plus grande densité du liquide, ouvrez l'œil, soyez toutes antennes au vent, car il est une seconde où tout à coup il devient crémeux, sans avoir bouilli, naturellement ».

Le mystère plane, l'alchimie n'est pas loin, et l'échec menace. Utilisons les proportions ici indiquées comme base de l'expérimentation. Après les avoir traduites en valeurs précises, tentons de modifier les proportions : préparons, par exemple, deux sabayons à quatre jaunes d'œufs et 200 grammes de sucre ; dans l'un, mettons 30 centilitres d'eau, et dans l'autre seulement 10 centilitres d'eau. Nous observons que le premier mousse, mais pas le second.

Comment expliquer ce phénomène ? Remarquons d'abord que le jaune d'œuf est connu pour épaissir les sauces et rigidifier les parois des mousses... à condition que celles-ci soient formées. Or, pour faire les parois qui séparent les bulles de la mousse, une quantité d'eau suffisante doit être présente. Le second sabayon semble manquer d'eau. Comment s'en assurer ? Au second sabayon, qui n'a pas moussé, ajoutons 20 centilitres d'eau, et reprenons la cuisson en fouettant : le



Quand on fouette des jaunes d'œufs et du sucre, le mélange blanchit, parce qu'on introduit des bulles d'air. Si on laisse trop longtemps les jaunes et le sucre sans les fouetter, le jaune coagule à la surface des cristaux de sucre, qui ne se dissolvent alors plus (un cristal apparaît ainsi au centre de la photographie).

sabayon finit par gonfler. C'est la preuve qu'il manquait initialement d'eau, mais c'est aussi une indication importante pour le cuisinier : si son sabayon ne mousse pas, il peut le reprendre en augmentant la quantité de liquide.

Quel est le rôle du sucre ? Il donne du goût au plat, certainement, et ses molécules (de saccharose) fortement hygroscopiques lient des molécules d'eau ; l'eau ainsi liée ne peut alors plus former le cœur des parois qui séparent les bulles. Pour tester cet effet du sucre, comparons le premier sabayon à des sabayons qu'on prépare à partir de quatre jaunes, 100 grammes de sucre seulement, et respectivement 10 et 30 centilitres d'eau : le premier monte bien, mais moins que les précédents, car il contient une pro-

portion inférieure d'eau par rapport à l'œuf, et le second monte bien, mais se reliquifie, car il contient trop peu d'œuf.

LA CUISSON

Préoccupons-nous maintenant de la cuisson. Comment chauffer le sabayon ? Sans soutien théorique, l'observation semble montrer que les sabayons ne gonflent bien que si le chauffage est initialement lent, avant d'être plus intense. Pourquoi ce comportement ? Examinons cette question en cherchant pourquoi le sabayon mousse ? De la vapeur serait-elle formée au fond de la casserole, et piégée par la coagulation de l'œuf ? Dans cette hypothèse, on devrait mesurer une température de 100 degrés au fond de la casserole, au moment où le sabayon se met à mousser. Toutefois cette idée se heurte à l'empirisme des chefs, qui signalent parfois que le sabayon doit être porté à 80 degrés pour mousser. Alors ?

Alors raisonnons : si l'on utilise un fouet pour préparer un sabayon, c'est manifestement que l'on cherche à introduire de l'air dans la sauce. Et la seule transformation physico-chimique qui se produise lors de la cuisson est la coagulation des jaunes d'œufs, à 68 degrés. Faisons alors la prévision qu'il n'est pas nécessaire de chauffer le sabayon à 80, ni même à 100 degrés pour le voir mousser (le blanc d'œuf mousse à la température ambiante) et qu'une température de 68 degrés suffit à stabiliser la mousse formée, en rigidifiant, par coagulation des protéines du jaune, les parois entre les bulles.

Confirmée par l'expérience, nous avons ainsi les ingrédients théoriques de la description d'un bon sabayon. Doit-on préférer un chauffage à la température de 68 degrés, de 80 degrés ou de 100 degrés ? Selon Pierre Hermé, chef pâtissier du Salon de thé Ladurée, à Paris, le sabayon idéal serait celui qui n'a pas le goût d'œuf cuit. De ce fait, le sabayon cuit à 68 degrés serait meilleur. Sa confection sera plus longue, mais que ne ferait pas un gourmand pour accéder au sabayon platonicien ?

Hervé THIS

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 24 février 1997, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.

Les mathématiques introduites en Bourse

CHRISTIAN WALTER

En 1900, Louis Bachelier, génie méconnu, utilise les théories des probabilités et de la diffusion de la chaleur pour étudier l'évolution de la rente.

Quand la science a-t-elle été utilisée en finance ? S'il s'agit de la théorie financière moderne appliquée aux marchés de capitaux, c'est-à-dire de l'approche probabiliste du comportement des marchés, la réponse est claire : le 29 mars 1900.

À cette date, Louis Bachelier soutient sa thèse pour l'obtention du doctorat en mathématiques, thèse qui porte sur la «Théorie de la spéculation», et qui étudie comment formaliser, au moyen de méthodes probabilistes, les variations de la Bourse de Paris.

C'est la première fois, depuis que les bourses existent, que l'on considère les fluctuations des marchés comme les résultats de tirages aléatoires. La totalité des développements probabilistes ultérieurs qui, à partir des années 1970, constitueront le cœur théorique de la finance de marché, sont issus des prémisses de la thèse de Bachelier.

L'originalité du sujet de la thèse de Bachelier frappe de stupeur le jury, où siège Henri Poincaré. Poincaré laisse filtrer son étonnement : «Le sujet s'éloigne un peu de ceux qui sont habituellement traités par nos candidats». Commentaire qui jette un doute sur le sérieux de l'entreprise : la bourse ne se prête pas à des développements mathématiques, pensent les universitaires, les mathématiques ne doivent pas se compromettre avec l'argent. Réapparaissent ainsi les critiques de Platon, rappelées par Plutarque, sur la dégradation des mathématiques lorsqu'elles deviennent appliquées, «les faisant descendre des choses intellectuelles et incorporelles aux choses sensibles et matérielles (...) où il faut trop vilement et trop basement employer l'œuvre de la main». Les mathématiques pour l'argent ? Pour la bourse ? Incongruité en 1900.

Le développement des marchés dérivés a pourtant donné raison aux utilitaristes modernes : l'usage des mathématiques en bourse a été validé par la

fécondité technique des applications innombrables que l'outil élaboré par Bachelier a permis de réaliser. Si, aujourd'hui, il est possible d'acheter des produits financiers qui permettent de bénéficier des hausses de marché, sans subir les conséquences des baisses, c'est parce qu'en 1900, quelqu'un a eu cette idée invraisemblable à l'époque, que l'on pouvait utiliser la théorie des probabilités pour modéliser les fluctuations boursières.

Que dit Bachelier ? Dans sa thèse de doctorat, il écrit : «Les influences qui déterminent les mouvements de la Bourse sont innombrables, des événements passés, actuels ou même escomptables, ne présentant souvent aucun rapport apparent avec ses variations, se répercutent sur son cours». Il ajoute : «La détermination de ces mouvements se subordonne à un nombre infini de facteurs : il est dès lors impossible d'en espérer la prévision mathématique».

Examinant ce «nombre infini de facteurs», Bachelier retrouve dans l'étude du marché boursier des considérations

que Gauss avaient déjà rencontrées : la somme de petits aléas indépendants. Les variations induites par cette somme d'aléas suivent la célèbre loi normale, dite «de Laplace-Gauss». Bachelier décrit alors la variabilité du marché au moyen de la dispersion gaussienne et calibre les variations boursières par la variance.

D'un point de vue dynamique, Bachelier invente le concept de rayonnement de la probabilité : «chaque cours rayonne pendant l'élément de temps vers le cours voisin une quantité de probabilité proportionnelle à la différence de leur probabilité (...) la loi qui précède peut, par analogie avec certaines théories physiques, être appelée la loi du rayonnement ou de diffusion de la probabilité». Diffusion : le mot est dit. Cinq ans avant Einstein, Bachelier invente le premier processus de diffusion connu : le mouvement brownien. Ainsi le premier mouvement brownien apparaît en finance avant d'être utilisé, avec le succès que l'on connaît, en physique.

Poincaré apprécie cette vision : «La manière dont Louis Bachelier tire la loi de Gauss est fort originale et d'autant plus intéressante que le raisonnement pourrait s'étendre avec quelques changements à la théorie des erreurs. Il le développe dans un chapitre dont le titre peut sembler étranger, car il l'intitule «Rayonnement de la probabilité». C'est en effet à une comparaison avec la théorie analytique de la propagation de la chaleur que l'auteur a eu recours. Un peu de réflexion (*sic*) montre que l'analogie est réelle et la comparaison légitime. Les raisonnements de Fourier sont applicables presque sans changement à ce problème si différent de celui pour lequel ils ont été créés. On peut regretter que l'auteur n'ait pas développé davantage cette partie de sa thèse». Partie que les universitaires américains développeront trois quarts de siècle plus tard. En examinant le comportement de la rente à la bourse de Paris, Bachelier a retrouvé la loi de Gauss et l'équation de la propagation de la chaleur.

L'utilisation intensive de processus de diffusion en finance de marché illustre l'importance qu'ont prise les mathématiques en Bourse.

Le choix de son sujet a porté préjudice à Bachelier : sa carrière universitaire s'en est ressentie. Après avoir eu beaucoup de difficultés à obtenir un poste de professeur de mathématiques, il a terminé sa carrière à l'Université de Besançon. Il meurt le 28 avril 1946. Six ans après, un universitaire américain, Harry Markowitz, soutient sa thèse sur la théorie du portefeuille, pour laquelle il obtient le prix Nobel d'économie. Comme dans certaines introductions en bourse, autres sont ceux qui sèment, autres sont ceux qui moissonnent.

THEORIE DE LA SPÉCULATION.

Par M.L. BACHELIER

INTRODUCTION

Les influences qui déterminent les mouvements de la Bourse sont innombrables, des événements passés, actuels ou même escomptables, ne présentant souvent aucun rapport apparent avec ses variations, se répercutent sur son cours.

À côté des causes en quelque sorte naturelles des variations, interviennent aussi des causes factices : la Bourse agit sur elle-même et le mouvement actuel est fonction, non seulement des mouvements antérieurs, mais aussi de la position de la place.

La détermination de ces mouvements se subordonne à un nombre infini de facteurs : il est dès lors impossible d'en espérer la prévision mathématique. Les opinions contradictoires relatives à ces variations se partagent si bien qu'au même instant les acheteurs croient à la hausse et les vendeurs à la baisse.

Les divas donnent le la

Les sopranos sont plus gênées que les basses par la hausse du diapason.

Le diapason sur lequel les musiciens accordent leur instrument donne la fréquence du *la* de référence, le *la*₃. Sa hauteur a notablement varié au cours des siècles : de 404 hertz sous Louis XIV et Louis XV, le diapason est passé à 423 hertz sous Napoléon I^{er}, pour fluctuer entre 446 et 457 sous le Second Empire. La hauteur du diapason a non seulement varié dans le temps, mais aussi dans l'espace, puisque jusqu'au milieu du XIX^e siècle, 17 diapasons étaient en usage dans les grandes villes d'Europe, ce qui obligeait les artistes lyriques à chanter la même œuvre à des hauteurs différentes selon qu'ils se produisaient à Paris ou à Vienne.

Pour essayer de remédier à cet état de fait, le directeur du Conservatoire de Paris tente, en 1812, d'imposer un diapason dont la hauteur correspond à la moyenne entre les divers *la* relevés dans la capitale, mais il faudra attendre 1858 pour qu'une commission ministérielle soit nommée. La commission Lissajous-Halévy entreprend une enquête internationale qui révèle un écart de plus d'un ton entre les différents diapasons européens : on joue plus bas à Londres (434 hertz) qu'à Bruxelles (445 hertz). La commission fixe le diapason à 435 hertz à la température de 18 °C.

En 1859, un arrêté ministériel ratifie cette décision en France, et un diapason-étalon est déposé au Conservatoire national des arts et métiers. En 1939, une commission internationale réunie à Londres fixe la hauteur du diapason à 440 hertz à 20 °C, mais cette décision, qui reste sans effet en raison de la guerre, ne sera entérinée qu'en 1975.

Ce sont les sopranos qui se plaignent surtout de la montée constante du dia-

pason, et parmi elles Maria Callas, Renata Tebaldi et Montserrat Caballé. En 1987, cette dernière confiait : « Je me souviens que je chantais à Florence, en 1975, *Le Trouvère* sous la direction de Thomas Schippers. L'orchestre finissait à 446 ! Là, je me suis plainte : j'ai été trouver le Maestro et je lui ai dit que je ne voulais pas chanter Leonora à cette hauteur et pousser ma voix dans une tessiture anormale et inhumaine. »

Gêne réelle ou caprice de diva ? Les acousticiens de la musique sourient depuis toujours aux doléances des cantatrices lorsqu'elles prétendent que la montée du diapason sur des intervalles musicaux aussi infimes qu'un comma les fatigue ou compromet leur santé vocale : c'est parce qu'ils abordent la question du point de vue de la perception auditive uniquement, et non de la production des sons (le comma est le plus petit intervalle musical discernable). Nous avons voulu savoir ce qui se passe du point de vue physiologique.

Pour cela, nous avons utilisé un programme de simulation des vibrations des cordes vocales élaboré par Daniel John Hirst, de l'URA 261 CNRS, qui permet de calculer le nombre total de vibrations des cordes vocales pour les différentes hauteurs de diapason, en fonction de la fréquence et de la durée de chaque note d'un morceau. Nous avons constaté que si un écart d'un comma entre le diapason officiel et le diapason d'orchestre

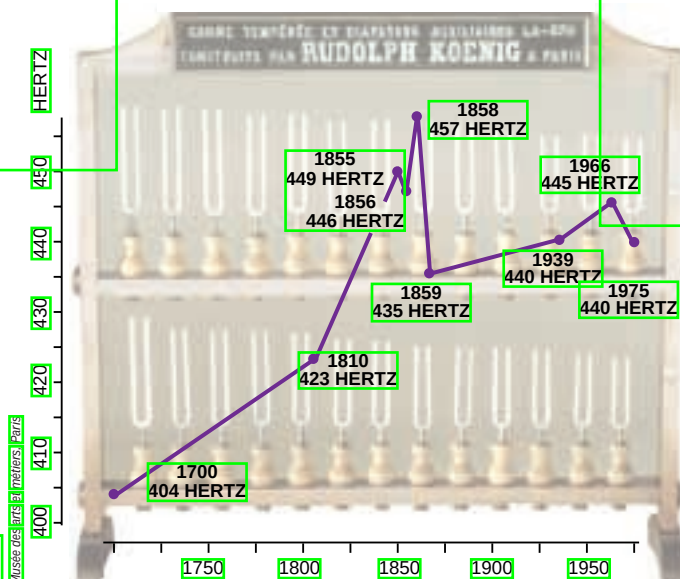
est négligeable sur le plan de la perception, il n'en est pas de même sur le plan de la production.

Pour les voix masculines qui sont situées dans la partie inférieure de l'échelle sonore, la différence entre le nombre de vibrations par seconde des cordes vocales est minime pour les deux diapasons, mais ce n'est pas le cas pour les voix féminines. Ainsi, par exemple, lorsque le diapason est à 445 hertz, les cordes vocales d'une basse vibrent en moyenne 41 fois de plus pour l'ensemble de sa tessiture, c'est-à-dire pour l'ensemble des notes qu'il peut chanter du grave à l'aigu, que lorsque le diapason est à 440 hertz, tandis que les cordes vocales d'une soprano vibrent 160 fois de plus.

Les sopranos légers coloratures qui ont les voix les plus aiguës sont davantage concernées par ce phénomène. Ainsi, aujourd'hui, dans *La Flûte enchantée* de Mozart, la Reine de la Nuit doit émettre des « contre-*fa* » périlleux, puisqu'avec le diapason d'orchestre, ils sont à 1 413 hertz, alors qu'au moment de la création de l'ouvrage, en 1791, le diapason était à 404 hertz, et le contre-*fa* à 1 283 hertz. Par conséquent, entre le contre-*fa* de l'époque de Mozart et celui d'aujourd'hui, il y a une différence de sept huitièmes de ton sur le plan de la perception et de 130 hertz sur le plan de la production. Autrement dit, les cordes vocales des chanteuses actuelles qui émettent les contre-*fa* de la Reine de la Nuit vibrent 130 fois de plus en une seconde. Étant donné que les chanteuses tiennent généralement cette note une dizaine de secondes, cela représente 1 300 vibrations de plus pour la durée totale du contre-*fa*.

L'évaluation théorique de la fatigue vocale des chanteurs en fonction de la montée du diapason réalisée grâce à notre programme devra être complétée par une étude physiologique qui mettra définitivement un terme à la querelle qui oppose les divas et les acousticiens depuis des lustres.

Nicole SCOTTO DI CARLO –
Laboratoire Parole et
Langage – URA 261 – CNRS



Variations de la hauteur du diapason au cours des siècles.

Des éponges à fibres optiques

Leurs «épines»
captent la lumière.

On ne reconnaît aux éponges qu'une seule activité, celle qui consiste à filtrer l'eau qui les traverse pour en capter les substances nutritives. R. Cattaneo-Vietti et ses collègues de l'Université de Gênes ont montré qu'une éponge de l'Antarctique utilise ses spicules de silice pour capter la lumière solaire et en faire bénéficier une algue avec qui elle vit en symbiose.

Rossella racovitzæ est une éponge dotée d'une charpente robuste constituée de baguettes de silice qui font saillie, tels des piquants de hérisson. Certains ont la forme d'une épine lisse, d'autres sont ramifiés à leur extrémité. Ces spicules découragent les prédateurs, mais ils servent aussi aux éponges à s'adapter à leur environnement. Les extrémités des spicules de certaines éponges, telle *Rossella antarctica*, servent d'ancre : elles s'accrochent dans le sable ou dans les sédiments, de sorte que l'éponge résiste aux courants.

Rossella racovitzæ vit dans les eaux froides et obscures de l'Antarctique, à 120 mètres de profondeur dans la mer de Ross. On a observé que des algues brunes (des diatomées) adhèrent à la base de ses spicules. Les symbioses entre éponges et bactéries sont très fréquentes, mais celles entre éponges et algues sont rares. Quand une telle symbiose



Eponge dont les spicules canalisent la lumière.

existe, les algues sont des espèces microscopiques unicellulaires ou filamenteuses qui adhèrent à des éponges vivant dans les eaux chaudes des mers tropicales, à proximité de la surface. Comment l'algue symbiotique de *Rossella racovitzæ* survit-elle en eau profonde ?

Les chercheurs italiens ont prélevé sur une éponge *Rossella racovitzæ* des spicules longs de dix centimètres. Après les avoir courbés, ils ont suivi la transmission d'un rayon laser émis sous différents angles d'incidence : comme dans une fibre optique, l'intensité lumineuse est transmise quasi intégralement à l'autre extrémité du spicule quand la source lumineuse est perpendiculaire à l'entrée, c'est-à-dire perpendiculaire à la croix qui le termine. En outre, cette croix semble canaliser l'énergie lumineuse : en son absence, moins du tiers de l'intensité lumineuse incidente est transmise. Ces spicules transmettraient à l'éponge et à son algue symbiotique l'énergie lumineuse nécessaire à leur survie. Les fibres optiques ont-elles été découvertes par une éponge, il y a quelques centaines de millions d'années ?

Marie-Thérèse LANDOUSY

BRÈVES

Barrage et poissons

Le remplissage de la retenue du barrage hydroélectrique de Petit-Saut, sur le fleuve Sinnamary en Guyane, inonde près de 350 kilomètres carrés de forêt tropicale depuis juin 1995. Selon Bernard de Mérona, de l'ORSTOM, les poissons n'ont, pour l'instant, pas trop souffert des perturbations hydrologiques. En aval, il y a au total autant de poissons qu'auparavant. Toutefois, 12 des 20 espèces les plus abondantes se sont raréfiées. Dans le lac, les captures sont trois à quatre fois plus nombreuses que dans la rivière, et neuf espèces dominent, en alternance, le peuplement.



LE MONTAGNARD

Solutions d'avenir

Pour dissoudre des hydrocarbures dans l'eau, on ajoute du savon, longues chaînes moléculaires dont chaque extrémité se lie soit à l'eau soit aux hydrocarbures. Le savon qui forme un «pont» entre les deux phases solubilise les hydrocarbures. Des chimistes italiens et américains ont synthétisé une famille de molécules analogues au savon qui permettent de dissoudre des produits organiques dans le dioxyde de carbone liquide. Celui-ci, abondant, facile à manipuler et inerte, pourrait donc remplacer de nombreux solvants organiques et halogénés, toxiques, utilisés dans l'industrie.

Vivre avec le virus Ebola

Aucune personne infectée par le virus Ebola ne semblait survivre. Pourtant des analyses de sang réalisées par une équipe de l'ORSTOM sur 200 pygmées vivant dans des campements forestiers en République centrafricaine ont révélé la présence d'anticorps anti-Ebola dans un cinquième de cette population. Ainsi ces personnes ont été contaminées par un virus Ebola qui est inoffensif, contrairement aux virus très pathogènes qui ont déclenché des épidémies au Zaïre. Les pygmées, qui vivent dans la forêt tropicale humide, ont plus souvent des anticorps anti-Ebola que les villageois habitant à la lisière de la forêt.

Suite page 26

Avortement régulateur

En Roumanie, la pyramide
des âges est modelée par
les mesures anti-avortement.

En Roumanie, comme dans la plupart des pays d'Europe centrale et orientale depuis la Seconde Guerre mondiale, l'avortement est le principal mode de régulation des naissances. En 1997, le planning familial et les moyens modernes de contraception y sont encore peu utilisés. Les évolutions de la législation concernant l'avortement ont donc des conséquences directes sur la natalité. La pyramide des âges établie par Cornelia Muresan, de l'Université de Cluj, d'après les chiffres du recensement de 1992 montre que les irrégularités sur les 50 dernières années suivent l'assouplissement

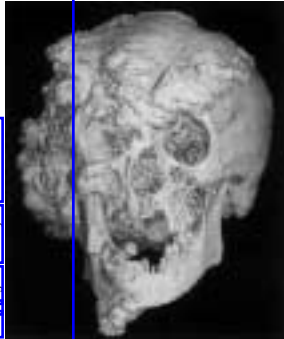
et le durcissement de la réglementation de l'avortement.

Selon le Code pénal promulgué en 1948 par le nouveau régime communiste, l'avortement est un délit. Cette position est toutefois progressivement assouplie : en 1955, un décret annule le caractère délictueux si l'intervention est pratiquée par un médecin et pour certaines catégories de grossesses à risques ; en 1957, l'avortement devient autorisé sans conditions sur simple demande. Pendant les dix années suivantes, la natalité baisse régulièrement.

La situation change brusquement en 1966 : l'avortement est à nouveau presque totalement interdit. L'effet de surprise est complet : la fécondité double entre 1966 et 1967. Le succès de ces mesures natalistes se maintient l'année suivante. Cette interdiction marque le début d'une période volontariste, où le

L'homme-éléphant

Joseph Carrey Merrick, l'homme-éléphant de l'époque victorienne, que David Lynch a immortalisé dans un film, ne serait probablement pas atteint de neurofibromatose, une maladie génétique rare dont cette hypertrophie crânienne aurait été le symptôme. Des radiologues de l'hôpital royal de Londres, où sont conservés les os de Merrick, ont montré qu'il aurait souffert d'une maladie plus rare encore, le syndrome de Protée. Des radiographies et des tomographies aux rayons X du crâne de Merrick ont révélé un épaissement de certains os crâniens, caractéristiques de cette maladie non-héréditaire, due à un dysfonctionnement de la croissance cellulaire.



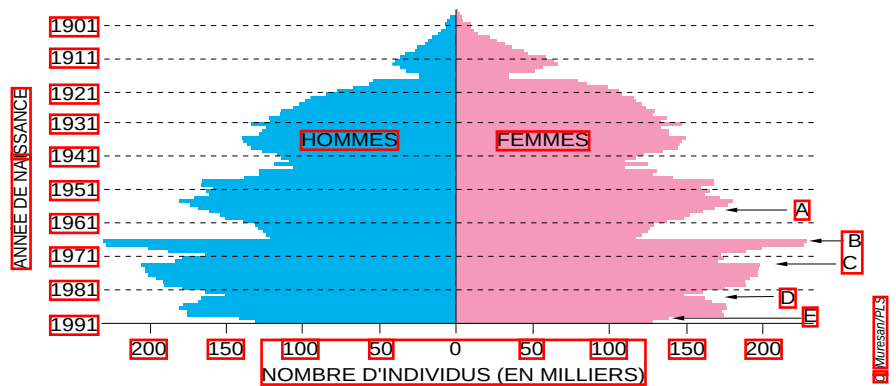
Stress et Guerre du Golfe

Pendant la Guerre du Golfe, les soldats américains recevaient un traitement préventif contre les effets des gaz neurotoxiques. On a alors constaté une augmentation des maux de tête, des insomnies, des troubles de l'attention, qui indiquaient que le médicament traversait la barrière, quasi imperméable, qui protège le cerveau. Ainsi la perméabilité de cette barrière augmentait chez les soldats soumis au stress du combat. Cette nouvelle propriété pourrait être utilisée pour faire pénétrer des molécules thérapeutiques dans le cerveau, dans des conditions de stress, mais... en temps de paix.

L'entendement de l'enfant

Les bébés utilisent les régularités statistiques du langage pour distinguer les mots à l'intérieur des phrases. Jenny Saffran et ses collègues, de l'Université de Rochester, ont fait entendre à un groupe d'enfants de huit mois, pendant deux minutes, des suites de syllabes dénuées de sens, sans accentuation ni rythme, contenant des «mots» de trois syllabes répétés plusieurs fois dans des ordres différents. Immédiatement après, les bébés distinguent les mots des autres enchaînements de trois syllabes moins fréquents, tels ceux formés par la fin d'un mot et le début d'un autre.

Suite page 28



Les irrégularités de la pyramide des âges de Roumanie en 1992 proviennent des fluctuations de la législation sur l'avortement, moyen quasi exclusif de régulation des naissances. Autorisé à partir de 1957 (A), l'avortement est brusquement interdit en 1965 (B). L'application de cette interdiction est renforcée en 1973 (C) et en 1984 (D). Il redevient légal en 1989 (E).

gouvernement tente de maintenir la natalité à des valeurs élevées. La même année, un impôt est institué sur les célibataires et les couples sans enfants, et le divorce est interdit.

La natalité recommence malgré tout à diminuer dès 1969, ce qui conduit le gouvernement à renforcer les contrôles sur l'application de la loi en 1973. La fécondité des roumaines augmente à nouveau, mais pendant moins de dix ans : en 1983, il ne naît plus que 2,06 enfants par femme, moins que le seuil de renouvellement des générations de 2,1 enfants par femme. La tendance est à nouveau inversée à partir de 1984 par un renforcement supplémentaire des contrôles sur l'application de la loi et une pression accrue sur les responsables de la santé.

A partir de 1990, le recours à l'avortement, de nouveau autorisé sans conditions, redevient massif. La chute de la fécondité est sans précédent : 1,44 enfant par femme en 1993.

Pendant toute cette période, le rapport du nombre d'avortements à celui des naissances a été élevé. Entre 1960 et 1965, il est passé de 2,2 à 4. Entre 1967 et 1989, alors que l'avortement était illégal, les estimations en comptent entre 0,4 et 1,4 pour une naissance, mais le nombre de décès de femmes consécutifs à un avortement laisse penser qu'il est supérieur. En 1990 et 1991, après la chute du régime communiste, on compte trois avortements pour une naissance. Aujourd'hui, ce chiffre diminue lentement.

L'oiseau danseur

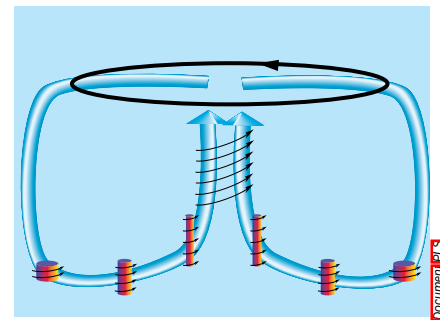
Pour se nourrir, le phalarope tourne comme une ballerine.

Le phalarope, oiseau marin des rivages arctiques qui ressemble à une petite mouette, fait preuve d'une adaptation étonnante : incapable de plonger, il crée un tourbillon par des battements de pattes, mouvements qui aspirent à la surface les insectes et les petites crevettes dont il se repaît.

Au département de biologie de l'Université de Californie, William Hamner et ses collègues ont étudié les mouvements de cet oiseau derviche. Chaque rotation dure une seconde et nécessite sept ou huit battements de pattes. Alors que son corps a un mouvement de rotation continu, sa tête tourne de manière saccadée, comme la tête d'une ballerine, par angles de 45 degrés. Entre deux rotations, l'oiseau scrute l'eau à la recherche

des proies que son ballet nautique remonte à la surface. En moins d'une demi-seconde, il s'en saisit et les avale. L'oiseau donne ainsi jusqu'à 180 coups de bec par minute.

Quelle est la nature des mouvements hydrodynamiques qui remontent les proies ? Les battements rapides expulsent



Des tourbillons, créés par les battements de pattes, sont entraînés dans le flot dû au remplacement de l'eau de surface. Ces tourbillons s'étirent et agissent comme des pompes aspirantes.



Le phalarope produit un tourbillon ascendant qui aspire ses proies vers la surface.

de l'eau de la surface qui est remplacée par de l'eau profonde. Une circulation d'eau s'établit ainsi entre la surface et les profondeurs. Ce mouvement de convergence de la matière est lent et peu efficace. Aussi, pour remonter les proies, Jean-Marc Chomaz, du laboratoire d'hydrodynamique de l'École polytechnique invoque la création de mini-tornades.

Outre l'expulsion de l'eau, les huit battements de pattes par seconde créent des paires de tourbillons de sens opposé, de la même manière que le passage d'une rame dans l'eau. Certains de ces tourbillons se retrouvent sous l'oiseau. Comme la vitesse d'ascension varie avec la profondeur, les tourbillons sont étirés. Ce mécanisme d'étirement explique aussi la formation des tornades ou des tourbillons de vidange d'une baignoire. Comme dans les tornades, les tourbillons étirés tournent alors plus vite en raison de la conservation de leur moment cinétique. La différence de pression entre la base et le sommet des tourbillons les transforment en de minuscules pompes aspirantes qui contribuent à la remontée des particules avoisinantes.

Dans un aquarium d'un mètre cinquante de profondeur, toutes les particules qui se trouvent à 50 centimètres sous l'oiseau sont entraînées dans le mouvement ascendant. Cette méthode de pêche est encore plus efficace lorsque le fond se trouve à cinquante centimètres car les tourbillons « nettoient » alors toute nourriture posée sur le fond.

Jamais un phalarope n'a été vu pêchant par cette méthode sur une mer agitée : la houle désorganise le flot circulant. Selon les naturalistes, les oiseaux plus gros ne pourraient pas tourner suffisamment vite pour remonter leur nourriture à la surface de cette manière.

Le regard du scribe

Ses yeux composites imitent les éléments de l'œil humain.

Le scribe égyptien, assis en tailleur, scrute ses visiteurs ; certains prétendent qu'il les suit des yeux. Le souci du réalisme a-t-il guidé les artistes qui ont sculpté ce personnage dans un bloc de calcaire, puis qui l'ont peint et ont taillé des pierres pour ses yeux ? La structure des globes oculaires incite à le croire : elle reproduit en partie celle des yeux humains, notamment pour la pupille.

Découvert à Saqqarah, une nécropole de l'ancienne Memphis, au milieu du XIX^e siècle par l'égyptologue français Auguste Mariette, le « scribe accroupi » est vraisemblablement l'image d'un défunt dont il ornait la sépulture. Le socle sur lequel il reposait, dont les hiéroglyphes auraient aidé à l'identifier, a été détruit. Le style de la statue la rattache à la V^e dynastie, qui régnait sur l'Égypte entre 2620 et 2200 avant notre ère.

Les yeux enchâssés dans les

orbites sont composés de plusieurs éléments. L'iris, partie centrale convexe, est un cristal de quartz parfaitement transparent et exempt de défauts. L'analyse des éléments chimiques à l'aide d'un accélérateur de particules confirme la qualité de cette pierre : elle n'est composée que de silicium, sans trace d'impureté. La face postérieure du cristal est dépolie et couverte d'une couche de matière

organique qui donne à l'iris sa couleur gris-bleu.

Dans cette face postérieure de l'iris, une perforation de quelques millimètres de profondeur apparaît plus sombre, par contraste, à l'observateur qui la voit par transparence : elle figure la pupille de l'œil. Une telle cavité, observée sur des yeux détachés d'autres statues, a été étudiée, dans le cas du scribe, par la réflexion d'un faisceau laser.

L'iris est enchâssé dans un bloc blanc de carbonate de magnésium. Cette pierre, naturellement veinée de rouge par des impuretés de fer, est semblable à la sclérotique, partie blanche de l'œil parcourue par de petites veines. La similitude est renforcée par de la peinture rouge qui souligne la partie interne de l'œil, près des glandes lacrymales.

Chaque œil est maintenu entre deux larges griffes de cuivre, soudées sur le côté. Les radiographies, réalisées par Thierry Borel, montrent que ces feuilles métalliques s'enfoncent dans l'orbite. Leur bord visible, aplati, dessine autour de l'œil un contour vert sombre.

L'imitation du visage humain réside aussi dans l'imperfection géométrique.

Les petits décentrages des pupilles dans les iris et des iris dans les sclérotiques renforcent l'impression de vie et de mobilité des yeux. Les sculpteurs égyptiens étaient-ils ophtalmologues ?

Anne BOUQUILLON et Guirrec QUÉRÉ, LRMF



COUPE DE L'ŒIL

L'œil du « scribe accroupi » (à droite en coupe) a une structure proche de l'œil humain ; la pupille est un trou dans l'iris (en bleu), un cristal de quartz, dont la face postérieure est couverte d'une couche organique. L'iris est enchâssé dans la sclérotique (en rose). Des feuilles de cuivre (en vert) maintiennent l'ensemble dans l'orbite.

Un dinosaure à plumes?

Quel est l'ancêtre des oiseaux? Un petit dinosaure carnivore ressemblant à *Compsognatus*, découvert en Chine dans des sédiments très fins, aurait le long de sa colonne vertébrale des structures organiques ressemblant à des plumes. Cette découverte réjouirait les paléontologues qui pensent que le premier oiseau, *Archaeopteryx*, serait un descendant des dinosaures. Il faudra toutefois s'assurer que les plumes devinées ne sont pas des écailles.

**Danser sur la glace**

On a longtemps prétendu que, si les skis et les patins glissaient sur la neige ou sur la glace, c'était parce que la pression exercée faisait fondre la couche superficielle, réduisant les frottements. Toutefois cette hypothèse n'est pas satisfaisante : la pression exercée par le sportif n'est pas suffisante. Au Laboratoire Lawrence Berkeley, Michel van Hove et Gabor Somorjai ont montré par diffraction d'électrons lents qu'il existait en permanence une couche d'eau à la surface de la glace, même à très basse température (-180°C). Les molécules d'eau sont liées au réseau cristallin, mais elles possèdent, dans la partie supérieure de la couche, la fluidité du liquide.

Pollen et déclenchements

Le fonctionnement des lignes électriques est sensible à la foudre, au vent, à la neige collante. Sur la base de corrélations, L. Coste, H. Richard et P. Ruffaldi expliquent certaines décharges des lignes par la présence de pollen, qui serait la deuxième source d'accidents après la foudre. Le colza, dont la floraison est spectaculaire en avril et mai, donna lieu à des déclenchements généralisés dans la région de Verdun en mai 1990.



Ces accidents sont d'autant plus fréquents que le taux d'humidité est important ; en revanche, la période suivant une forte pluie est exempte de déclenchement : il est bien connu des allergiques que les orages lavent l'air.

Qu'est-ce qu'une planète?**Découverte de sept nouveaux objets extra-solaires.**

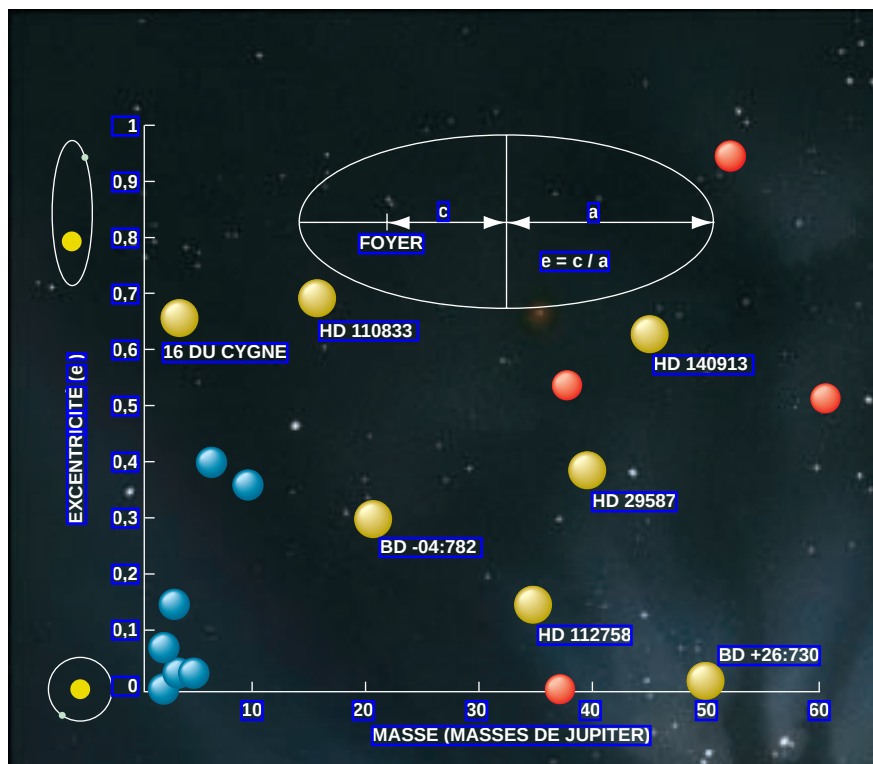
Dans la récente moisson d'objets orbitant autour d'étoiles proches, on distinguait les planètes des naines brunes, petites étoiles qui ne s'allument pas. D'une part, on avait détecté sept planètes, objets dont la masse est inférieure à dix fois la masse de Jupiter avec des orbites quasi circulaires et, d'autre part, quatre naines brunes d'une quarantaine de masses de Jupiter, qui comme les étoiles dans les systèmes doubles peuvent avoir des orbites excentriques. Cette distinction simpliste vient de tomber : on vient de découvrir sept nouveaux objets extra-solaires de masses comprises entre 1 et 40 fois la masse de Jupiter avec des excentricités variées.

Les planètes sont formées par accrétion de poussières et de roches d'un disque protoplanétaire. Par ce mécanisme, l'orbite de l'objet formé est circulaire et sa masse ne peut

habituellement pas croître au-delà de dix fois la masse de Jupiter, car elle aurait alors rassemblé la totalité de la matière située sur son passage. En revanche, les naines brunes se forment comme les étoiles, par fragmentation et effondrement d'un nuage de gaz. La masse des naines brunes est comprise entre 13 et 80 fois la masse de Jupiter (au-dessus de 80 masses de Jupiter ce sont des étoiles) et elles ont des excentricités variées.

L'équipe de Michel Mayor, à l'Observatoire de Genève, a annoncé la découverte de six nouveaux objets. L'un d'eux, orbitant autour de l'étoile BD +26:730, possède une masse de 50 fois celle de Jupiter sur une orbite quasi circulaire. En revanche, un autre objet (autour de HD 110833) de 17 fois la masse de Jupiter possède une orbite très allongée. D'autre part, William Cochran et ses collègues viennent également d'annoncer la découverte d'un compagnon de une masse de Jupiter autour de l'étoile 16 B de la constellation du Cygne avec une orbite très excentrique. Quelle est la nature de ces objets?

Pour le compagnon de HD 110833, l'orbite allongée et la masse élevée laisseraient penser qu'il s'agit d'une naine



Lorsque l'on porte l'excentricité des objets extra solaires découverts en fonction de leur masse, on distinguait les planètes (en bleu), de faible excentricité et de masses inférieures à dix fois la masse de Jupiter, des naines brunes (en rouge), d'excentricité variées et de masses supérieures à 40 masses de Jupiter. La découverte d'une dizaine de nouveaux objets (en jaune) de masses et d'excentricités variées rend cette distinction moins claire.

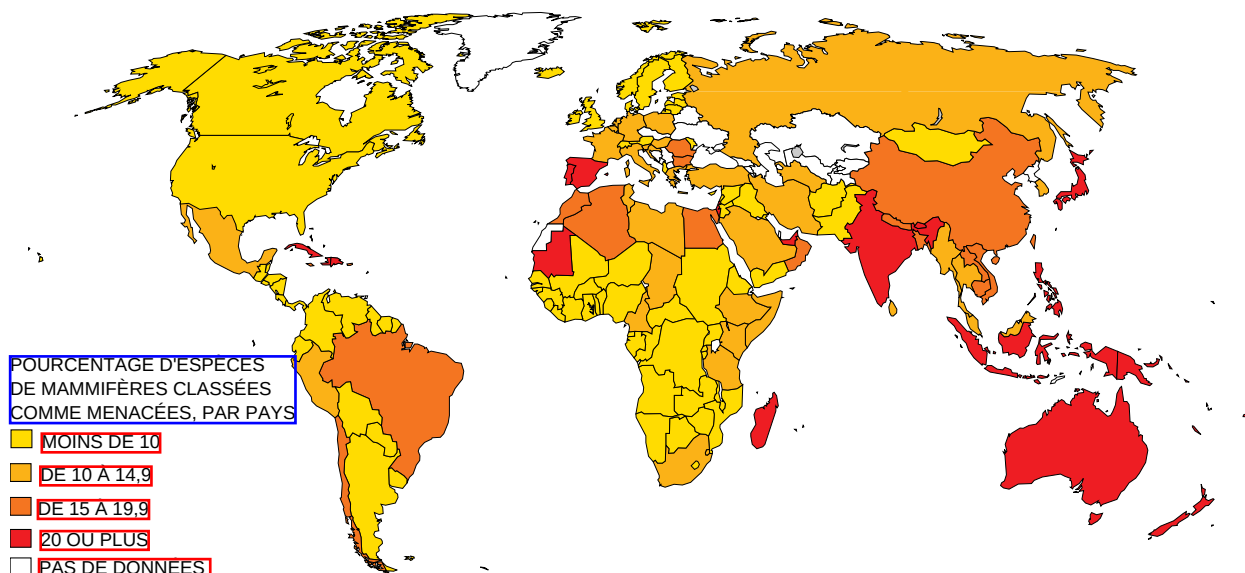
brune. Cependant, il pourrait aussi s'agir d'une planète initialement sur une orbite circulaire et dont l'orbite aurait été rendue excentrique par la perturbation d'une étoile proche. De surcroît, l'évolution dynamique d'un objet de masse initiale proche de la limite supérieure théorique (dix fois la masse de Jupiter) lui confère une orbite de plus en plus excentrique. Sur ces orbites, les planètes brassent plus de matière

du disque protoplanétaire que sur une orbite circulaire, elles peuvent ainsi croître par accrétion de poussières jusqu'à des masses supérieures à dix masses de Jupiter.

Grâce à ces découvertes, il n'existe plus de «trou» dans l'intervalle compris entre 10 et 40 fois la masse de Jupiter. La différence entre planète et naine brune s'estompe : aujourd'hui, la masse des objets détectés varie de manière

continue entre une fois et 80 fois celle de Jupiter et les excentricités varient également. La masse et l'excentricité ne sont donc plus les critères déterminants pour connaître la nature des objets. Avant d'aller voir sur place, seule la comparaison entre les modèles théoriques et les données issues de nouvelles découvertes permettra de trancher sur le mode de formation de ces objets et donc, sur leur nature.

Mammifères en danger



Les paléontologues ont répertorié cinq extinctions massives de la faune terrestre depuis 500 000 ans. Sommes-nous à la veille d'un sixième événement analogue? Oui, si l'on en croit une récente étude de l'Union internationale de conservation de la nature. Un comptage plus précis des espèces animales montre que plusieurs classes d'animaux sont plus menacées qu'on ne le pensait : environ 25 pour cent des espèces de mammifères risquent de disparaître. Les amphibiens, les poissons et les reptiles sont menacés dans des proportions proches, tandis que les oiseaux le sont moitié moins.

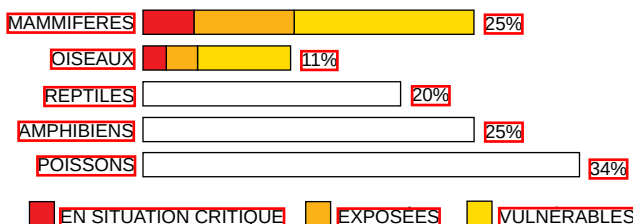
Sur les 4 327 espèces connues de mammifères, 1 096 risquent l'extinction à plus ou moins long terme. On distingue trois niveaux de gravité dans la menace : l'extinction des 169 espèces de mammifères en «situation critique» est imminente ; les espèces «exposées» s'éteindront probablement dans un futur proche ; les espèces «vulnérables», enfin, courent un grand risque d'extinction à moyen terme. Sur les 26 ordres de mammifères, 24 sont menacés. Les plus atteints sont les éléphants, les primates et les périssodactyles (tels les rhinocéros et les tapirs).

Ces données sous-estiment probablement le nombre d'espèces en voie d'extinction dans certaines régions. Elles indiquent toutefois que la modification et la destruction des habitats naturels par l'homme sont parmi les plus importants facteurs de risque. C'est particulièrement le cas pour les espèces endémiques, spécifiques à des zones géographiques isolées. Aux Philippines et à Madagascar, par exemple, respectivement 32 et 44 pour cent des espèces de mammifères sont menacées de disparition.

Dans ces deux pays, plus de la moitié des espèces sont endémiques et la destruction des habitats est étendue. À l'opposé, au Canada et aux États-Unis, respectivement quatre et huit pour cent des espèces de mammifères sont menacées : moins d'un quart des espèces des États-Unis et seulement quatre pour cent de celles du Canada sont endémiques ; les habitats sont relativement bien préservés aux États-Unis et encore mieux au Canada.

L'Indonésie, avec 128 espèces de mammifères menacées, est le pays à plus fort risque. La Chine et l'Inde viennent ensuite, *ex aequo*, avec 75 espèces menacées. Ces trois pays sont parmi les plus densément peuplés de la planète et rassemblent 43 pour cent de la population mondiale.

POURCENTAGES D'ESPÈCES MENACÉES



Les données pour les reptiles, les amphibiens et les oiseaux sont insuffisantes pour déterminer les différents niveaux de risques.

Sources : Liste rouge des animaux menacés, UICN, 1996 et Biodiversity Data Sourcebook, World Conservation Monitoring Center, 1994.

Les bâtisseurs de pyramides

Sans doute moins nombreux que l'écrivait Hérodote.

Combien les pharaons employaient-ils d'ouvriers quand ils bâtissaient les pyramides ? Hérodote, dont la fiabilité n'est pas assurée, signalait que 100 000 personnes avaient contribué à la construction de la Grande Pyramide, mais cet auteur vivait 2 000 ans après la construction. L'archéologue Stuart Kirkland Wier, de Cambridge, évalue plus précisément le nombre des ouvriers bâtisseurs démontrant, encore, s'il en était besoin, l'intérêt des calculs d'ordre de grandeur en sciences.

S. Wier s'est intéressé à la pyramide de Khéops, à Giza, construite 26 siècles avant notre ère. Le monument mesurait initialement 146,7 mètres de hauteur, avec une base carrée de 230,4 mètres de côté : son volume était égal à 2,59 millions de mètres cubes, et sa masse à sept millions de tonnes. Si l'on suppose que la pyramide fut construite au cours de la vie d'un seul pharaon (ce qui est court, comparé au temps de construction des cathédrales), les ouvriers ont travaillé environ 8 400 jours.

Les pierres étaient taillées et traînées jusqu'au site de la pyramide sur des traîneaux en bois ; elles étaient tirées à l'aide de cordage fixés très bas, de sorte que la traction des ouvriers assurait également un léger dégagement de l'avant recourbé des traîneaux. Des ouvriers étaient chargés de chercher de l'eau, qui, versée à l'avant du traîneau, favorisait le glissement. Le Français Henri Chevrier a démontré l'efficacité de cette méthode pharaonique, qui, à l'aide de boue, permettait de déplacer

les plus lourdes charges. On ignore comment les pierres furent levées, mais on peut calculer la quantité d'énergie qui fut nécessaire pour les monter : en divisant le volume par le temps, on trouve que les constructeurs ont dû installer 309 mètres cubes de roche par jour, en moyenne. Or la quantité d'énergie qu'un ouvrier dépense quotidiennement est d'environ 240 000 joules, et l'énergie potentielle de la pyramide érigée est de 2 500 milliards de joules. Aussi, pour lever les pierres, il aurait fallu environ 1 250 ouvriers travaillant pendant les 8 400 jours préalablement calculés.

On peut affiner le calcul en tenant compte des documents qui décrivent le travail : on sait où les roches furent taillées, de sorte que l'on peut calculer la quantité de main d'œuvre nécessaire au transport des pierres. D'autre part, une image qui figure sur la tombe du pharaon Djehutihotep montre une statue de pierre de cinq mètres de hauteur poussée sur un traîneau par 172 personnes. Une telle statue devait peser 58 tonnes, de sorte que les ouvriers devaient exercer une poussée de 330 kilogrammes chacun. Avec un coefficient de frottement égal à 0,034, la force exercée aurait été réduite à 11,5 kilogrammes.

Au total, S. Wier estime le nombre d'ouvriers entre 9 500 et 12 500, pour le début de la construction, 2 000 et 2 600 quand la hauteur atteinte était de 100 mètres, et 35 à 41 pour l'achèvement.

On peut aussi supposer que ce n'est pas le nombre d'ouvrier qui a changé, mais la vitesse d'exécution. Régissant sur une population supérieure à un million de personnes, le pharaon avait largement assez de main-d'œuvre à sa disposition pour construire sa pyramide ; ce qui est remarquable, dans l'entreprise, c'est surtout l'organisation du chantier : réunir 10 000 personnes pendant plus de 20 ans n'est pas chose aisée.

Contre le paludisme

Une molécule extraite de l'armoise tue le parasite de cette maladie endémique.

Plusieurs espèces d'armoise sont des plantes médicinales : l'armoise commune ou herbe de la Saint-Jean est abortive et l'armoise maritime est un vermifuge. L'estragon, la citronnelle, le génepi sont des armoises ; l'absinthe était élaborée à partir d'une variété d'armoise. L'armoise n'a pas encore révélé toutes ses vertus : un nouveau médicament efficace contre le paludisme en est extrait.

Chaque année, le paludisme tue environ 2,7 millions de personnes dans le monde et, en Afrique, un enfant de moins de cinq ans toutes les 30 secondes. Pour lutter contre ce fléau, on dispose de la quinine, mais le parasite a développé des stratégies de résistance à cet antipaludique. L'artéméthér, un nouvel antipaludique, est utilisé avec précaution pour éviter que le parasite ne devienne – aussi – résistant à ce médicament, aujourd'hui efficace.

Le parasite est véhiculé

par des moustiques, les anophèles, eux-mêmes toujours plus résistants aux insecticides classiques. Le parasite échappe au système immunitaire humain en changeant plusieurs fois d'apparence au cours de son cycle de vie. Il est injecté dans le sang de l'hôte par l'insecte vecteur, sous forme de sporozoïtes.

Ces derniers migrent vers le foie qui libère le parasite sous la forme de mérozoïtes dans l'organisme. Les mérozoïtes, qui se transforment notamment en schizontes, envahissent les globules rouges et déclenchent les

Sommité fleurie d'*Artemisia vulgaris* qui appartient à la famille des armoises, comme la plante dont est extrait l'artéméthér, un nouvel antipaludique.



Gravure des carrières de Tourah, au Sud du Caire, montrant le transport d'une colossale statue par des ouvriers égyptiens. Les cordages étaient fixés le plus bas possible, afin de favoriser le glissement. Un ouvrier arrose le sol, devant la charge, afin de favoriser le glissement du traîneau.

signes cliniques de la maladie. Les globules rouges infectés risquent d'obstruer les vaisseaux sanguins et de déclencher des embolies responsables de coma et de décès.

Quelques-uns des mérozoïtes se transforment en gamétocytes, lesquels infecteront les moustiques sains qui piqueront le patient. Ce dernier ressent une forte fièvre, des frissons et des tremblements. Il présente des épisodes de rémission qui correspondent aux premières phases du développement d'une nouvelle génération de parasites.

Ce sont les Chinois qui ont découvert les propriétés d'*Artemisia annua* L., ou *Qinghao* : les infusions des sommités fleuries de cette variété d'armoise soulagent les fièvres. Ils ont ensuite découvert que la plante est efficace contre le paludisme. En 1972, ils en ont extrait le principe actif, qinghaosu ou artémisinine.

Ensuite, ils ont fait l'hémisynthèse de plusieurs dérivés actifs, dont l'artéméther. Ce dernier est commercialisé en Chine depuis 1987. L'artémisinine est le chef d'une toute nouvelle famille chimique. Cette molécule tue la forme schizonte du parasite.

Depuis 1990, les Laboratoires Rhône-Poulenc Rorer ont obtenu les autorisations de mise sur le marché de cette molécule dans plus de 35 pays d'endémie palustre. Elle est commercialisée dans 25 pays d'Asie, d'Afrique et d'Amérique du Sud. La plupart des cas de paludisme infantile surviennent en Afrique, mais les parasites y sont encore généralement sensibles à la quinine.

L'artéméther, classé parmi les médicaments essentiels par l'Organisation mondiale de la santé, est aussi efficace que la quinine (selon certaines études, il serait même plus actif). Il fait baisser la

fièvre et élimine les parasites plus rapidement que les antipaludiques usuels.

En outre, il est administré par voie intramusculaire pendant trois ou cinq jours, tandis que l'administration de quinine se fait par voie intraveineuse pendant une dizaine de jours. Le traitement par la quinine exige un suivi hospitalier rigoureux, car plusieurs complications, notamment une hypoglycémie grave, risquent de survenir.

Pour que les parasites ne deviennent pas résistants à l'artéméther comme ils le sont à la quinine – auquel cas on serait totalement démuni devant cette maladie –, les experts ont décidé de réserver cette molécule aux cas graves ou résistants aux autres médicaments antipaludiques. C'est notamment le cas des personnes atteintes de neuropaludisme, une atteinte cérébrale fatale dans plus de 20 pour cent des cas.

Les insectes judiciaires

Les insectes sont de précieux témoins judiciaires.

Lorsque l'on découvre un corps en forêt, les gendarmes cherchent à dater la mort grâce aux mouches qui colonisent le cadavre. Leur cycle de ponte n'était connu que sur des morceaux de viande en laboratoire. La décomposition d'un porcelet dans une forêt de la région parisienne a permis d'étudier *in situ* la faune nécrophage.

Un corps sans vie intéresse les insectes nécrophages, à la recherche d'un organisme capable d'assurer la subsistance de leurs larves. Ces travailleurs de la mort, attirés par l'odeur de la matière animale morte, se succèdent au rythme des modifications du substrat nourricier et en fonction des conditions exté-

rieures. Avec les bactéries spécialisées, diverses escouades d'insectes accélèrent la dégradation de la matière organique et assainissent l'environnement.

Au laboratoire d'entomologie de la gendarmerie nationale, Jean-Marc Vian et Bernard Chauvet ont observé le cycle de ponte des mouches et l'évolution de la faune nécrophage sur un cadavre de porcelet. Ce cadavre de 25 kilogrammes, tué d'un coup sur la tête pour éviter les plaies, a été placé dans une forêt d'Île-de-France début août 1996. Il était dans une cage afin d'éviter que les mammifères n'interfèrent avec l'expérience en mangeant le porcelet. Chaque jour, les entomologistes ont observé le développement des pontes et l'état de décomposition du porcelet.

Dès les premiers jours, les mouches à viande, les *Lucilia Caesar*, arrivent (voir la figure 1). Ces grosses mouches bleues pondent des paquets d'une certaine



1. Dix-sept heures après la mort, les *Lucilia Caesar* apparaissent. Sur la gauche, près des plis de la peau, des paquets d'œufs blancs ont été pondus (flèches vertes). Près de la bouche, on observe les premières larves.

d'œufs dans les plis et les orifices naturels humides du corps. À leur naissance, les asticots s'enfoncent en tous sens sous la peau et aspirent les liquides résultants de la transformation des tissus organiques. Après dix jours (voir la figure 2), le cadavre paraît recouvert de larves. Il



2. Dix jours après la mort, les larves remplissent le cadavre. Elles vont sortir du substrat et s'enterrer.



3. Onze jours après la mort, toutes les larves ont quitté le cadavre du porcelet : il ne reste que le squelette et des lambeaux de peau.

en est aussi rempli et le lendemain, ces larves ont quitté le cadavre et se sont enfouies dans le sol. Il ne reste que le squelette et des lambeaux de peau qui disparaîtront en quelques mois.

La connaissance du cycle de ponte dans un habitat naturel permet d'adapter les cycles théoriques : aujourd'hui on date la mort avec une précision de deux jours, si la mort remonte à moins de six mois, et de une semaine, si la mort est antérieure. Outre son apport technique, cette expérience enseigne aux enquêteurs à rechercher des asticots autour du cadavre alors même que celui-ci en est exempt : ces précieux indices pour l'enquêteur ont pu en effet s'enfoncer dans le sol à l'entour.

Le prix immérité

Le problème à n -corps est résolu, mais trop tard.

En 1885 trois géants des mathématiques, Karl Weierstrass, Charles Hermite et Gösta Mittag-Leffler établirent une liste des problèmes mathématiques qui leur semblaient importants. Celui qui en résoudrait un seul recevrait 2 500 couronnes d'or à l'occasion du soixantième anni-

versaire du Roi de Suède, en 1889. Parmi ces problèmes, figurait le problème à n -corps : étant donné les positions et les vitesses initiales de n objets qui s'attirent selon la loi de la gravitation, par exemple les planètes du Système solaire, il fallait prédire leurs positions et leurs vitesses après un temps quelconque.

Après plus d'un siècle de recherches, le problème formulé par Weierstrass a été résolu par Wang Qiu-Dong en 1991. Personne ne s'en aperçut avant que Florin Diacu de l'Université de Colombie Britannique ne proclame sa pertinence dans le *Mathematical Intelligencer*.

Weierstrass était convaincu qu'il n'existait pas de solution analytique. Une solution analytique est une formule ne contenant qu'un nombre fini de termes, comme l'équation de l'ellipse, la solution du problème à deux corps (le mouvement de la Terre autour du Soleil). Weierstrass demandait aux concurrents non pas une telle formule, mais un série unique comportant un nombre infini de termes, et dont la somme donnerait la réponse avec autant de précision qu'on le désirait. Il fallait que la série solution converge pour toutes les valeurs du temps. Ainsi, la série $1 - a^2 + a^4 - a^6 + \dots$ converge si et seulement si a est compris entre -1 et $+1$.

Les collisions étaient une difficulté majeure. Si deux particules entrent en collision, alors les trajectoires indépen-

dantes n'existent plus et ces événements singuliers faisaient obstacle à la convergence des séries. Wang introduisit une dilatation temporelle, qui fait que le temps s'écoule plus vite à mesure que deux objets se rapprochent, et ainsi les collisions ne se produisent qu'après un temps infini. Ayant repoussé le problème jusque dans l'éternité, la série de Wang converge toujours.

Malheureusement la solution est de peu d'intérêt pratique car il faut additionner un nombre énorme de termes pour avoir une solution très approximative. Et Wang ne gagnera pas le prix : il a été décerné à Henri Poincaré qui avait montré qu'il ne pouvait exister de solutions pour des temps infinis.

L'article de Poincaré était brillant et allait mettre «sur orbite» ce que l'on désigne aujourd'hui par la théorie du chaos. Toutefois Poincaré n'était pas tatillon, et son article était truffé d'erreurs. À tel point qu'il dut être retiré de la vente par Mittag-Leffler et réimprimé, aux frais de Poincaré...

Il n'empêche : pour ce fait d'armes, Poincaré obtint injustement un prix qu'il méritait certainement mille fois pour sa vision de l'imprévisibilité du problème à n corps. Car outre le problème posé par les collisions, il subsiste la sensibilité aux conditions initiales découverte par Poincaré, sensibilité qui impose une précision initiale infinie si l'on veut prédire les mouvements des planètes à l'infini.

Christoph PÖPPE



Les mouvements des planètes, représentés ici sur une peinture de tapisserie du XVIII^e siècle, est le plus fameux exemple du problème à n -corps.



Henri Poincaré (1854-1912) a gagné le prix du roi de Suède en 1889 sur la base de son mémoire sur le problème à n corps. Une de ses affirmations n'a été infirmée qu'après un siècle.

L'invention retrouvée de la photographie

JEAN-LOUIS MARIGNIER • MICHEL ELLENBERGER

La reconstitution expérimentale des procédés de Niépce fondée sur l'interprétation de ses lettres dévoile le génie «édisonien» de l'inventeur de la photographie.

Nicéphore Niépce (1765-1833) a inventé le premier procédé photographique : il a ainsi exaucé le vieux rêve humain de fixer pour l'éternité un moment de vie. Ses recherches, commencées en 1816, ont duré plus d'une décennie, et les principaux résultats en sont consignés dans sa *Notice sur l'héliographie* de 1829.

Si les historiens de la photographie rendent généralement justice à cet inventeur de génie, ils situent mal son apport original et mésestiment les difficultés qu'il a affrontées, puisqu'ils ont analysé son œuvre sur la base des connaissances actuelles, évidemment inconnues du père fondateur. Niépce a utilisé de façon personnelle des concepts scientifiques et techniques de son époque et il les a énoncés dans un langage qu'il faut savoir déchiffrer.

En effet, la compréhension de ces documents, leur interprétation en termes actuels pour en situer le mérite et les enjeux sont les premières tâches de l'historien des sciences. Dans le cas de Niépce, l'analyse des textes est loin d'être suffisante. Il faut l'accompagner sur les diverses voies de son cheminement expérimental pour saisir le sens de telle expérience particulière, ou ce qui a motivé l'adoption ou le rejet de telle autre opération. C'est ce qu'a fait l'un de nous (J.-L. Marignier).

C'est en analysant les documents originaux que les expériences de Niépce ont été reconstituées. Ainsi

s'éclairent les observations de Niépce, ainsi sont comblées les lacunes de ses écrits, puisqu'il ne précisait pas certains phénomènes qui lui semblaient aller de soi. Cette démarche, la reconstitution expérimentale historique, permet de comprendre le principe, les mécanismes et performances du procédé, et d'éliminer les contresens faits par les historiens de la photographie (qui ne sont pas chimistes). Depuis 160

ans, cette reconstitution originale d'expériences historiques n'avait pas été faite dans sa totalité. Maintenant, il nous est possible de suivre les pas de Niépce pour saisir «l'instant de genèse» de la photographie.

La correspondance de Niépce, une source codée

En 1816, Nicéphore Niépce a cinquante et un ans. Il partage son temps entre sa maison de Châlon-sur-Saône et sa propriété, proche, de Saint-Loup-de-Varennnes, où il a installé son laboratoire. L'abondante correspondance qu'il entretient avec son frère Claude, son aîné de deux ans, qui habite à Londres, donne, au jour le jour, un reflet détaillé de ses activités ; il assure la difficile gestion du domaine familial et poursuit avec passion et persévérance ses recherches.

Il décrit à sa manière ses expériences, ses tâtonnements et les conclusions qu'il en tire. Une fois déchiffrée et placée dans son contexte, cette correspondance a valeur de cahiers de laboratoire. Écrite dans une prose claire et imagée, elle montre un vif sentiment de la nature. Nicéphore Niépce s'y révèle un inventeur curieux, alliant la vivacité d'esprit des Lumières à la sensibilité du premier romantisme.

Lorsque débutent, en 1816, les recherches de Nicéphore qui le mèneront à l'héliographie, les deux frères ont déjà une carrière d'inventeurs derrière eux. Ils ont mis au point le



1. NICÉPHORE NIÉPCE (1765-1833) est un inventeur prolifique : il met au point le premier moteur à explosion en 1807 et se consacre, à partir de 1816, à la photographie.

premier moteur à combustion interne, le *pyréolophore* (1807), ils se sont intéressés à la propulsion des bateaux, au pompage des eaux, à l'extraction de l'indigo, aux «végétaux nourissants». Ouverts à l'air du temps malgré leur éloignement de la capitale, ils participent activement à l'avènement du monde industriel.

L'idée qui guide les recherches de Nicéphore Niépce, telle qu'il la présentera dans sa *Notice* de 1829, est de «reproduire spontanément, par l'action de la lumière, avec les dégradations de teintes du noir au blanc, les images reçues dans la chambre obscure». Projet ancien, puisqu'il rappellera à son frère (lettre du 16 septembre 1824) qu'ils ont travaillé ensemble à cette découverte lors de leur séjour à Cagliari, en Sardaigne (1797). L'idée de conserver par des moyens chimiques l'image qui se forme dans la chambre obscure avait certes déjà été avancée en 1802 par Thomas Wedgwood (1771-1805), mais il n'y a aucune raison de supposer que les frères Niépce aient connu les tentatives de ce chercheur mort prématurément.

Le mois de mai 1816 apporte de grandes satisfactions à l'inventeur. Une couche d'un composé photosensible dont, d'après les textes ultérieurs, nous avons tout lieu de penser qu'il s'agissait de «muriate d'argent» (chlorure d'argent) qui noirci à la lumière, est étalée sur une feuille de papier. Celle-ci est placée au fond de la chambre obscure. L'objectif ayant été changé à la suite d'un incident, la focale utilisée (comme nous dirions aujourd'hui) est plus courte. L'incident est fécond. Niépce constate que l'image de la vue de sa fenêtre qui «se peint» sur le papier



BIBLIOTHÈQUE NATIONALE

2. VUE DE LA FENÊTRE à Saint-Loup-de-Varennes. Cette photographie, réalisée par Niépce en 1827, est la seule qui soit parvenue jusqu'à nous. C'est une image négative au bitume de Judée, sous-exposée, sur de l'étain blanc réfléchissant. Le vernis qui reste aux endroits illuminés a été attaqué par le solvant du fait de la sous-exposition et est devenu mat. Dans un endroit sombre et sous éclairage oblique, l'étain reflète de l'ombre (parties noires), alors que le vernis, qui diffuse la lumière, apparaît clair (parties blanches) : l'image semble être un positif. Le fait que les deux murs opposés à droite et à gauche soient éclairés simultanément témoigne de la longueur du temps de pose (au moins une journée). Cette photographie de l'image obtenue par Niépce a été réalisée sous éclairage rasant en 1952. Au tirage, le contraste a été augmenté artificiellement, puis la photographie a été retouchée. Le résultat est assez éloigné de la plaque de Niépce.

est plus lumineuse et plus nette que prévu, mais, sur la couche sensible, l'ordre des teintes est inversé.

«Le fond du tableau est noir, et les objets sont blancs, c'est-à-dire plus clairs que le fond.» Néanmoins, affirme Niépce, «la possibilité de peindre de cette manière me paraît à peu près démontrée» (lettre du 5 mai 1816). Nicéphore a réalisé ce jour-là le premier négatif photogra-

phique sur papier de l'histoire. Mais celui-ci n'est pas fixé, il continue à noircir quand on le regarde à la lumière.

Niépce multiplie les expériences, construit de nouvelles chambres obscures dont il garnit les objectifs de «disques de carton percé» (diaphragmes) pour gagner en netteté (la profondeur de champ augmente quand la taille du diaphragme diminue).



BIBLIOTHÈQUE NATIONALE

3. HELIOGRAPHIE au bitume de Judée sur étain réalisée de la même façon que la plaque de Niépce de la figure 2. En vue normale, l'étain reflète la lumière et l'image apparaît négative (a). En éclairage oblique dans un endroit sombre, l'image apparaît en positif (b).

a)

P.S. Jean-Louis Marquet



b)



c)



3. PROCÉDE PHOTOGRAPHIQUE DE NIEPCE. Le bitume est broyé en poudre et dissous dans de l'essence de lavande. La solution brune est étendue sur une plaque de cuivre recouverte d'argent (a), puis séchée à chaud. Après séchage, il reste sur la plaque d'argent une couche de vernis au bitume, très fine, brillante et de couleur vermeil. Cette pellicule de vernis est photosensible, sa solubilité diminuant avec l'exposition à la lumière. La plaque est exposée au fond

de la chambre obscure(b). Avec un objectif ayant une luminosité identique à celle de la lentille qu'utilisait Niépce, le temps de pose est de 3 à 4 jours pour un paysage en plein soleil. Après exposition à la lumière, aucune trace de l'image projetée n'est visible sur la plaque (c). Elle est alors immergée dans un bain d'essence de lavande diluée qui dissout les parties n'ayant pas, ou peu, reçu de lumière. Le bitume des parties illuminées est devenu insoluble dans l'essence de lavande

Il envoie à son frère de nouvelles épreuves (le mot est resté) de différents formats. Et il définit un triple programme : «1° de donner plus de netteté à la représentation des objets ; 2° de transposer les couleurs ; 3° et enfin de les fixer, ce qui ne sera pas le plus aisé ; mais [...] nous ne manquons pas de patience, et avec la patience on vient à bout de tout.» (Lettre du 19 mai 1816.) En langage actuel : améliorer l'optique ; inverser l'image négative en image positive (Niépce utilise les mots *teinte* et *couleur* pour *valeur*) ; fixer (autre terme qui s'est imposé) l'image. Ce dernier point est le plus important, puisque l'image obtenue continue de noircir quand on la regarde à la lumière.

Niépce tente déjà d'obtenir des images positives à partir d'une seule épreuve négative : «En mettant dans la boîte optique une épreuve bien marquée sur un papier [...] recouvert de la substance que j'emploie, l'image viendrait se peindre sur ce papier avec ses couleurs naturelles, puisque les parties noires de l'épreuve, étant plus opaques, intercepteraient plus ou moins le passage des rayons lumineux.» (Lettre du 16 juin 1816.) Cette expérience, proche de ce que nous appelons le tirage-contact, échoue.

Puis l'inventeur recherche des composés qui se décolorent à la lumière au lieu de noircir. Toutefois, le problème le plus difficile reste celui du fixage, c'est-à-dire de l'élimination du produit initial qui n'a pas été transformé par la lumière.

Empiriquement, il dresse un inventaire des corps sensibles à la lumière, condition préliminaire à l'avènement d'une nouvelle science, la photochimie. Il cherche aussi à conjuguer l'ac-

tion du «fluide lumineux» sur les composés sensibles et celle des acides sur la plaque de cuivre du graveur. Il pense à étendre un acide sur une plaque de métal et l'exposer à la lumière ; Niépce espère que la puissance de l'acide dépendrait de l'intensité de la lumière et que cet acide graverait plus ou moins le métal suivant les nuances de l'image projetée. Hélas, l'action d'aucun acide connu ne dépend de la lumière.

La notion d'image latente

D'essais en essais, Niépce affine son grand projet. Il ne lui paraît plus nécessaire que l'action de la lumière détermine sur le composé un changement visible à l'œil ; une seconde réaction pourrait faire apparaître l'image.

À la recherche de la substance photosensible, Niépce lit les traités de chimie, les dictionnaires, les encyclopédies. Il y apprend que la solubilité dans l'alcool de la résine extraite d'un arbre de Saint-Domingue, le gaïac, varie en fonction de l'exposition à la lumière. Il y aurait là, pour la première fois, un moyen chimique de distinguer la substance transformée par la lumière de celle qui ne l'est pas, et donc de fixer l'image. Les essais faits par Niépce à la lumière du soleil sont concluants, mais ne se reproduisent pas après exposition en chambre obscure. Aujourd'hui, nous en comprenons la raison : seuls les rayons ultraviolets transforment la résine de gaïac, et ils étaient filtrés par le verre ordinaire de la lentille qui équipait la chambre noire. Toutefois, ce premier essai décevant avec un corps organique (en langage actuel) met l'inventeur sur la voie du bitume

de Judée, ou asphalte. On en extrayait notamment de la mine du Parc, à Seyssel, à une centaine de kilomètres de Châlon-sur-Saône.

Le bitume de Judée, couche photosensible

Pour refaire l'expérience de Niépce, il faut broyer le bitume de Judée et le dissoudre dans de l'essence de lavande. La solution visqueuse est étalée sur une plaque de métal (dans le procédé le plus avancé, en 1828, une plaque de cuivre recouverte d'argent), séchée, et le tout est placé dans la chambre obscure. Après exposition, aucune image n'est visible.

La plaque est alors plongée dans un bain d'essence de lavande diluée qui dissout les seules parties qui n'ont pas, ou peu, reçu de lumière. C'est l'étape que nous appelons le *dépouillement*. L'image est rincée à l'eau et séchée. Sur les plages de lumière de l'image, le bitume résiduel reste brun ; à la place des ombres apparaît le métal brillant. Regardée en incidence normale, l'image est donc un négatif.

À partir de 1822, les expériences donnent des résultats prometteurs. Nicéphore Niépce obtient une image négative permanente, une *héliographie* ; il reste à en tirer une image positive.

Désormais, ses recherches s'orientent dans trois directions.

1. *Faire apparaître l'image positive par un simple effet d'éclairage.* Le traitement lui aura probablement été révélé lors de l'obtention d'images sous-exposées. Dans les parties de l'image correspondant aux zones d'ombre du sujet, on voit apparaître



et subsiste ; les zones illuminées demeurent sur la plaque (d). C'est un négatif. Pour obtenir un positif, l'image négative au bitume (de la maison de Niepce à Saint-Loup-de-Varennes) est placée dans une boîte (e) où sont disposés des cristaux d'iode qui s'évaporent spontanément. Les vapeurs d'iode traversent l'image au bitume et attaquent l'argent en surface : il se forme des dépôts d'iodure d'argent d'autant plus importants que le vernis est fin. À la lumière, l'iodure

d'argent se transforme en microparticules d'argent. À l'endroit des parties claires du négatif au bitume, la plaque d'argent devient noire, tandis que, dans les parties sombres, la plaque protégée par la couche épaisse de bitume demeure brillante. Après avoir éliminé le vernis avec de l'alcool, l'image positive apparaît sur la plaque d'argent (f). Les héliographies ainsi obtenues sont de grande qualité : on peut séparer 102 paires de traits par millimètre.

le métal poli. Par ailleurs, du fait de la sous-exposition, le vernis qui reste sur la plaque, dans les zones de lumière, est insuffisamment réticulé. Il est alors partiellement attaqué dans le bain d'essence de lavande diluée et devient mat. Sous un éclairage oblique, alors que les parties polies reflètent de l'ombre et sont peu lumineuses, le vernis mat paraît clair et l'image devient positive. Ainsi regardons-nous les daguerréotypes.

Niepce, qui avait déjà observé ce phénomène dès 1824, ne s'y intéressera qu'en 1827, pour l'abandonner un an plus tard. La célèbre héliographie *Point de vue du Gras* (1827 plutôt que 1826), la plus ancienne photo au monde, qui est conservée sous atmosphère d'hélium au *Harry Ransom Center* d'Austin (Texas), est de ce type. L'un de nous (J.-L. Marignier) a pu l'examiner hors de sa vitrine dans les conditions d'éclairage appropriées, constater les nuances que ne rendent pas les reproductions et en expliquer la genèse.

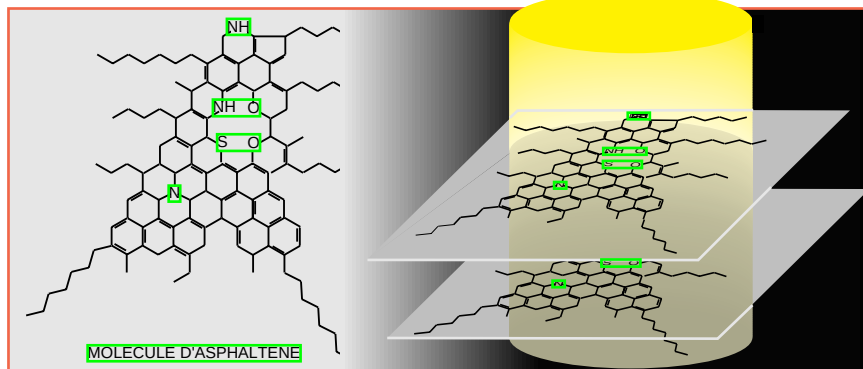
2. *Transformer la plaque héliographique en gravure à l'eau-forte.* La plaque est plongée dans un bain d'acide qui attaque et creuse les plages métalliques non protégées par le vernis. Les ombres sont ainsi gravées dans le métal, et le vernis peut être enlevé. La plaque (en cuivre ou en étain) est encrée, puis essuyée et recouverte d'une feuille de papier humide. Sous la presse, le papier va chercher l'encre au fond des plages gravées, les surfaces non attaquées restant blanches. Il en sort une image positive qui peut être tirée à un petit nombre d'exemplaires. Niepce travaille dans cette

voie à partir de 1824. L'inconvénient de la gravure à l'acide est de manquer de nuances ; elle ne convient qu'à la reproduction de dessins au trait ou de gravures dont les dégradés sont produits par des hachures. Niepce n'utilisera cette méthode que pour reproduire des gravures. Il en reste aujourd'hui quelque neuf exemplaires dans des musées de France et de Grande-Bretagne. Ce procédé a donné naissance à la *photogravure*, dont Niepce est incontestablement l'inventeur. Le bitume de Judée a d'ailleurs été utilisé à cette fin pendant des décennies. Ce même principe sert aujourd'hui, en microlithographie, à fabriquer les microcircuits électroniques.

3. *Inverser l'image négative par action chimique.* Le principe est le suivant : noircir sur le négatif au bitume les plages métalliques brillantes (les ombres du sujet, car c'est un négatif),

puis dévernir les autres plages sombres (les parties illuminées du sujet) pour laisser apparaître les différentes nuances des clairs. Niepce y travaille à partir de 1828. Il utilise des plaques en métal argenté poli, puis soumet le négatif à l'action des vapeurs corrosives d'iode. Là où le métal est à nu, il se forme rapidement une fine couche d'iodure d'argent. À la lumière, l'iodure se transforme en particules microscopiques d'argent métallique qui apparaissent noires à l'œil. Après élimination à l'alcool du vernis résiduel, l'image est un positif.

Lors de la reproduction de ce procédé, on ne peut qu'être émerveillé par la qualité et la finesse de l'image, comparable à celle des meilleures photographies actuelles. En effet, l'iode gazeux, en plus de son action sur le métal nu, diffuse à travers le vernis (ce que ne fait pas l'acide) en un temps proportionnel à son épaisseur. Le



4. *LE BITUME DE JUDEE, la couche photosensible utilisée par Niepce, est étendue sur une plaque de métal argenté. La couche est un asphalte constitué, à l'échelle atomique, de feuillets parallèles. Sous l'effet de la lumière, des liaisons locales se créent entre les feuillets de l'empilement. Après exposition, les parties illuminées sont moins solubles dans l'essence de lavande ; elles subsistent après dissolution des parties solubles et apparaissent en brun sur la plaque métallique.*

L'analyse expérimentale des travaux de Niépce

En 1989, j'entrepris des recherches sur le premier procédé photographique inventé par Nicéphore Niépce après avoir constaté que personne n'avait refait des héliographies et qu'aucune de celles faites par Niépce n'avait survécu. Seule l'épreuve de la figure 2 subsiste, mais cette ébauche dégradée par le temps n'est pas la forme finale de l'invention.

En étudiant le procédé de Niépce au bitume de Judée, je me heurtai à des contradictions. Les livres d'histoire de la photographie qui décrivaient le procédé étaient unanimes : selon ces auteurs, le bitume de Judée, qui est brun, blanchissait à la lumière, ce qui permettait d'obtenir directement un positif. Pourtant Niépce écrivait à propos de la plaque recouverte du vernis brun : «Après avoir été exposée assez de temps [à la lumière] pour que l'effet ait eu lieu, rien n'indique qu'il existe réellement ; car l'empreinte reste inaperçue.» Cela signifiait-il qu'une fois séché sur la plaque, le bitume était devenu entièrement blanc ? Une lecture attentive de la correspondance ne permettant pas de trancher, je décidai de refaire l'expérience.

Les premiers essais furent effectués avec du bitume commercial. Il fallut déterminer quelle quantité de bitume devait être dissous dans l'essence de lavande. À la première lecture, la description donnée par Niépce paraît simple : «Je remplis à moitié un verre de ce bitume pulvérisé. Je verse dessus, goutte à goutte, de l'huile essentielle de lavande jusqu'à ce que le bitume n'en absorbe plus et qu'il en soit seulement bien pénétré. J'ajoute ensuite assez de cette huile essentielle pour qu'elle surnage, de trois lignes environ, au-dessus du mélange qu'il faut couvrir et abandonner à une douce chaleur, jusqu'à ce que l'essence ajoutée soit saturée de la matière colorante du bitume. Si ce vernis n'a pas le degré de consistance nécessaire, on le laisse évaporer, à l'air libre, dans une capsule.» Trois lignes correspondent à un peu moins de sept millimètres. Le bitume se dissout très lentement dans l'essence de lavande et il faut une journée pour que l'essence devienne brune. Au fil des jours, elle devient de plus en plus épaisse. À quel moment avait-elle la consistance nécessaire ? Comment devait-on étaler le vernis au tampon ?

Niépce indique, dans un écrit ultérieur, qu'il étale ses vernis au pinceau. C'est ce que je fis. Une fois la plaque enduite, Niépce explique : «On place ensuite la

planche sur un fer chaud [...] et, lorsque le vernis ne poisse plus, on retire la planche pour la laisser refroidir et finir de sécher à une température douce.» Les premières expériences montrèrent que le mauvais choix d'un seul paramètre (temps de dissolution, quantité étalée, température de séchage, temps de chauffage) entraînait l'échec. Après de multiples essais, je définissais la préparation comme suit : trois grammes de bitume dissous dans 15 millilitres d'essence de lavande, utilisation de cette solution après quatre ou cinq jours, séchage à 90 °C pendant 20 minutes. L'étalement restait alors le seul paramètre sur lequel on pouvait agir : après avoir acquis le coup de main, les expériences furent reproductibles.

L'héliographie retrouvée

Afin de me rapprocher davantage des travaux de Niépce, je me rendis sur le site des mines de bitume de l'Ain, où Niépce s'était approvisionné. Bien que non exploitées depuis longtemps, je localisai ces mines grâce aux renseignements des anciens de la région, et je prélevai quelques kilogrammes de calcaire imprégné de bitume. L'extraction du bitume eut lieu au laboratoire. Au moyen de lampes dont le flux lumineux était contrôlé, je mis en évidence les effets de variations de solubilité, car c'était là le vrai principe de l'héliographie. En effet, le premier résultat intéressant fut de montrer que le bitume ne change pas de couleur sous la lumière, mais qu'il s'insolubilise plus ou moins en fonction de l'intensité de lumière reçue. Le principe de l'héliographie était retrouvé.

Parallèlement, le temps de pose apparaissait beaucoup plus long que les huit heures annoncées dans la littérature. Il me fallut attendre cinq jours pour obtenir une image dans une chambre photo équipée d'un objectif aussi lumineux que celui de Niépce. Curieusement, Niépce n'a jamais mentionné le temps de pose dans aucun de ses écrits. Mais, en 1824, il expliquait à son frère : «J'ai fait [...] un nouveau point de vue du Gras, sur mon autre grande pierre, et j'ai recommencé mes deux petits points de vue, sur pierre et sur verre, du côté de la basse-cour. Les deux premiers seront prêts samedi prochain, et celui sur verre, qui a été mis plus tard, lundi soir.» Cette lettre est écrite le jeudi qui précède. Seule la pratique, c'est-à-dire la réalisation d'images sur des pierres lithographiques et sur verre per-

mit d'expliquer ce passage et d'affirmer que le temps de pose pour l'image sur verre mentionnée par Niépce était bien de cinq jours.

Dès les premiers résultats, les images présentèrent une très haute définition, ainsi qu'un excellent dégradé de teintes qui ne pouvaient se prévoir au vu de la seule image connue de Niépce (figure 2). Il apparaissait aussi de façon éclatante que l'image au bitume de Judée était négative, au lieu d'être directement positive comme on le croyait. Or Niépce ne pouvait se satisfaire d'un négatif, comme en témoignent tous ses efforts pour inverser l'image (gravure sur cuivre à l'acide de 1822 à 1827 et traitement aux vapeurs d'iode à partir de 1828).

Pourtant une phrase de la *Notice* sur cette image négative au bitume excitait ma curiosité : «Une chose certaine c'est, qu'après le lavage, pourvu que l'empreinte soit bien sèche, le résultat obtenu est déjà satisfaisant.» Comment une image négative peut-elle être satisfaisante ? C'est à nouveau l'expérience qui permit d'interpréter cette phrase : au cours d'un essai, une image négative au bitume de Judée apparut, tantôt positive, tantôt négative, selon l'angle sous laquelle on la regardait. L'image avait été obtenue par sous-exposition et de ce fait le vernis, attaqué par le dissolvant, était mat, et non plus brillant. Seul le support parfaitement poli renvoyait soit la lumière, soit l'ombre, et ce reflet, suivant son intensité, faisait paraître le vernis plus foncé ou plus clair, d'où une image négative ou positive qui satisfaisait Niépce.

Niépce avait observé et exploité l'effet négatif / positif. Un écrit de 1824, le confirme : «Comme cette contre-épreuve n'est presque pas colorée, on ne peut bien juger de l'effet qu'en regardant la pierre obliquement ; c'est alors qu'il devient sensible à l'œil, à l'aide des ombres et des reflets de lumière.» Il ajoutait : «...et cet effet, je puis le dire, mon cher ami, a quelque chose de magique.»

Le fait d'avoir connu ce type d'images me permit, au cours d'un séjour que je fis à Austin (Texas) en 1990, d'expliquer comment était faite la plaque de Niépce. C'est une image sur de l'étain blanc pur, brillant comme un miroir (l'étain blanc ne s'oxyde pas à l'air). Niépce s'est arrêté à l'image au bitume sans traitement ultérieur, car là aussi il s'agit d'un négatif, visible en positif sous un éclairage oblique.

Pour la première fois, on comprenait comment avait été réalisée cette plaque et on pouvait la dater.

Niépce se heurta à des difficultés pour graver à l'acide ses «points de vue» : la présence du vernis sur toute la surface, qui permettait de reproduire les demi-teintes, empêchait que l'acide n'atteigne le métal, comme l'ont montré les expériences en laboratoire. Je tentai alors de rendre le vernis le plus mince possible, au détriment de la richesse des demi-teintes. Lorsque le vernis fut extrêmement fin, j'obtins des images où l'acide, en traversant le vernis, gravait le métal suivant une multitude de points. Je compris aussitôt que j'observais l'effet de «sablé» que mentionne Niépce dans les lettres qu'il échange avec le graveur-imprimeur lorsqu'il met au point l'invention de la photogravure au trait.

Le Physautotype

La reconstitution des expériences se révèle fructueuse : elle me permet de redécouvrir le Physautotype inventé par l'association Niépce-Daguerre, procédé demeuré jusqu'ici inconnu, et dont la base est le résidu de l'essence de lavande. En 1830, Daguerre est intrigué par le résidu qu'il obtient après distillation de l'essence de lavande. Il commente sa distillation de l'essence de lavande dans une lettre à Niépce de février 1830. En langage codé, certains mots sont remplacés par des numéros, et ceux entre parenthèses ont été ajoutés au crayon par Niépce : «*Mais voici le grand point pour la promptitude. Il arrive tout à fait la même chose avec le 53 (distillation), qu'avec le 14 (jour). Ce qui reste dans le 53 (distillation) après le 55 (évaporation) est inattaquable par le 21 (dissolvant). Les parties qui reçoivent le 14 (jour) facilite [sic] le 55 (évaporation). Ce qui reste sur la planche est de même inattaquable par le 21 (dissolvant). Donc le 14 (jour) semble agir comme le 24 (feu), ce qui prouve seulement que le même principe, celui qui opère se trouve dans ces deux actions.*

Comment comprendre de tels textes ? Les lettres de Daguerre en sont remplies. Un seul moyen : refaire l'expérience. Au cours de la distillation, l'essence de lavande, initialement jaune clair, devient de plus en plus foncée jusqu'à devenir

brune. À la fin, il ne reste plus qu'un goudron solide brun noir. C'est le résidu. Cette couleur brune ne pouvait se laisser deviner, car Arago avait déclaré en 1839 que le résidu était un produit intéressant «à cause de sa plus grande blancheur». Je compris, en reconstituant le procédé, que le résidu en solution dans de l'alcool, une fois étalé sur le support, donne une couche de couleur blanche qu'Arago confondait avec la couleur du résidu. La couleur est en fait identique à celle du bitume. Et c'est là que tout s'éclaire. C'est dans cette couleur que Daguerre vit des analogies avec le bitume. Il constata que ce résidu n'était pas soluble dans les solvants du bitume, c'est-à-dire qu'il se trouvait dans un état identique à celui du bitume après expo-

allait jusqu'à prétendre que la lumière provoquait une évaporation ! Il pensait, semble-t-il, que ce qui restait sur la plaque, après l'effet de la lumière et le dépouillement, était le résidu brun de l'essence de lavande obtenu par action de la lumière, comme par l'action de la chaleur. C'est avec ce même résidu que, deux ans plus tard, les deux associés mettront au point le nouveau procédé.

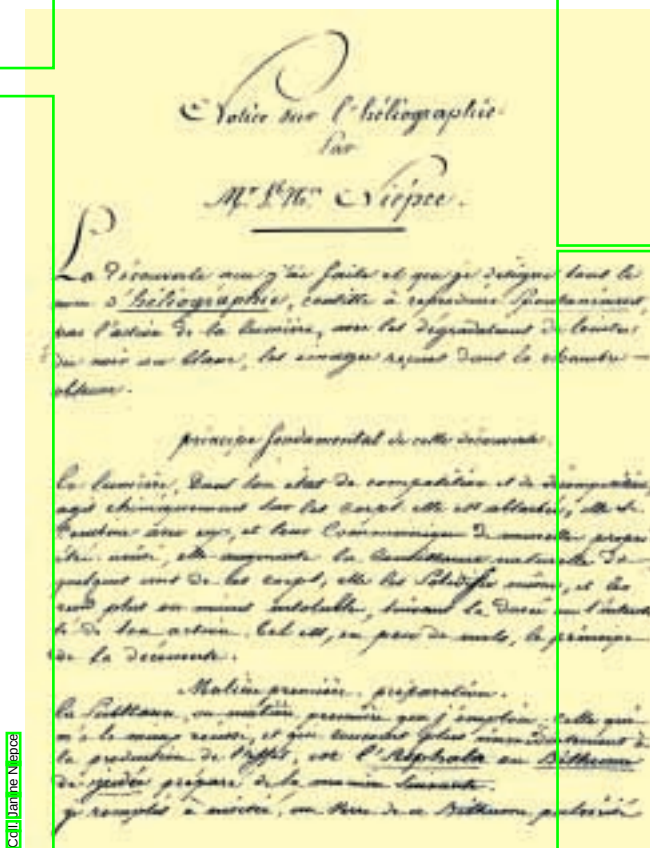
Le malentendu expliqué

La redécouverte de ce second procédé ou physautotype contredit ce qui avait été écrit sur la collaboration Niépce/Daguerre, qualifiée indûment de stérile. Au contraire, il apparaît maintenant que cette collaboration avait bien fonctionné et porté ses fruits. Un second procédé a été inventé, à temps de pose réduit. Les images étaient directement positives en une seule opération de révélation, ce qui était le but souhaité dès le début de l'association.

Un autre résultat important fut de découvrir que les images obtenues ressemblent à s'y méprendre à des daguerréotypes, c'est-à-dire aux images que Daguerre produira par le procédé qu'il inventera en 1839, après la mort de Niépce, en s'inspirant des travaux de la collaboration. On comprend maintenant pourquoi s'est installée une polémique entre la famille de Niépce et Daguerre quand celui-ci divulgua en 1839 son procédé portant son nom. En effet, Daguerre montra des images, les daguerréotypes, dont l'aspect était identique à celles que la famille de Niépce avait vu réaliser pendant l'association. Il était

logique qu'elle crie au vol de l'invention de Niépce, ce en quoi elle n'avait pas complètement tort, car si les procédés étaient différents, il n'en demeure pas moins que Daguerre emprunta de nombreux aspects des travaux de Niépce pour mettre au point son invention.

JEAN-LOUIS MARIGNIER



Première page de la Notice sur l'héliographie de Niépce, rédigée en 1829 pour Daguerre afin d'établir leur association.

sition à la lumière, mais là, c'était la chaleur qui était responsable de cet état. Il en déduisit que la lumière et la chaleur produisaient le même effet.

Il n'eut pas de mal à aboutir à cette conclusion, car, à plusieurs reprises, Niépce lui avait signalé cette similitude des effets de la lumière et de la chaleur. Daguerre

a



P.L.S./Jean-Louis Marquès

b



c



6. RECONSTITUTION D'UN PHYSAUTOTYPE selon le procédé de Niépce et Daguerre. Une résine de pin est fondue pendant quelques heures à 200 °C et versée dans un mortier (a) pour être broyée après refroidissement ; quelques milligrammes de la poudre obtenue sont ensuite dissous dans de l'alcool (b). On verse la solution jaune sur la plaque d'argent support (c). Après évaporation, la plaque est recouverte

de treize ans de travail obstiné, le difficile passage de la science «privée» à la science «publique» peut s'effectuer. Dans cet ambitieux dessein, Nicéphore Niépce va s'associer avec Louis-Jacques-Mandé Daguerre (1787-1851), son cadet de 22 ans.



de treize ans de travail obstiné, le difficile passage de la science «privée» à la science «publique» peut s'effectuer. Dans cet ambitieux dessein, Nicéphore Niépce va s'associer avec Louis-Jacques-Mandé Daguerre (1787-1851), son cadet de 22 ans.

Avant d'évoquer les acquis de cette collaboration, il est intéressant de revenir, en fonction de la physico-chimie actuelle, sur les transformations chimiques subies par le bitume de Judée. La molécule photosensible de ce composé est l'asphalène. Constituée d'un feuillet aromatique plan entouré de chaînes aliphatiques, ces molécules s'organisent naturellement en empilements parallèles. Que se passe-t-il sous l'influence de la lumière? Il est admis que les feuillets se lient en fonction de l'intensité de lumière reçue (processus de réticulation par photo-oxydation). L'action des photons restant locale, la résolution est excellente. L'épaisseur de la couche photosensible après dépouillement varie avec les gradations de clair-obscur, ce qui forme l'empreinte de l'image.

En revanche, la sensibilité est très faible. Niépce n'a pas précisément indiqué le temps de pose nécessaire pour obtenir ses «points de vue». Les expériences montrent qu'il était de l'ordre de 40 à 60 heures pour un paysage par temps ensoleillé. Cela correspond à une sensibilité de 10^{-6} ISO! (Les films actuels ont une sensibilité de 100 ISO.)

Associés par contrat le 14 décembre 1829, Niépce et Daguerre se fixent deux objectifs : (1) obtenir directement une image positive, sans passer par un négatif, et (2) raccourcir le temps de pose, qu'ils appellent la «promptitude».

contraste et la densité du positif dépendent donc de la durée de l'exposition à l'iode. Notons que l'iode avait été découvert en 1811 par Courtois et que son action sur l'argent avait été étudiée quelques années plus tard

par Gay-Lussac: Nicéphore était à l'affût des avancées de la chimie.

En 1829, l'inventeur peut estimer avoir rempli le programme qu'il s'était fixé en 1816! Son invention est mûre pour être divulguée au public. Au bout



d'un dépôt de résine blanc (d). Nous souhaitons ici tirer une diapositive grand format posée en contact (e) avec la plaque (temps d'exposition de ce tirage contact : 10 minutes). Après exposition, l'image

encore invisible est placée au-dessus d'une cuvette contenant du pétrole blanc (f). L'image, le palmarium des jardins Albert Kahn, à Boulogne, apparaît sous l'action des vapeurs de pétrole et elle est fixée (g).

L'association avec Daguerre

Niépce transmet à Daguerre sa passion pour la chimie. Pendant quatre ans, jusqu'à la mort de Niépce, Daguerre séjourne, à quatre reprises et parfois jusqu'à deux semaines, à Saint-Loup-de-Varennes pour travailler du matin au soir aux expériences communes. Dans les intervalles, ils communiquent par lettres, et celles de Daguerre ont été conservées. Un long travail d'analyse a permis de reconstituer pour la première fois les travaux des deux associés et de les reproduire en laboratoire.

En deux ans et demi ils mettent au point un nouveau procédé photographique que Niépce nomme le *physautotype* (mot néo-grec savant signifiant «image de la nature par elle-même»). La mince couche photosensible est constituée de résines ou de résidus de distillation de l'essence de lavande. Elle est étendue sur une plaque de métal argenté. Après exposition en chambre noire, la plaque est révélée à la vapeur de pétrole blanc (les raisons physico-chimiques de ces phénomènes ne sont pas encore complètement élucidées). Vue en éclairage oblique, l'image obtenue est positive. La résolution est excellente, les nuances sont bien rendues. Le temps de pose a été réduit à une journée, voire à trois ou quatre heures pour des objets rapprochés.

Les deux hommes savent qu'ils sont tout près d'aboutir. Mais Daguerre insiste pour ne pas divulguer leur invention avant d'avoir atteint le but : un temps de pose d'un quart d'heure au plus. «Dans l'état où sont les arts présentement il ne faut pas arriver à demi, car le moindre perfectionnement

apporté à une découverte fait souvent oublier son premier auteur», avait-il déjà écrit à Niépce, le 12 octobre 1829. Remarque ô combien pertinente!

Après la mort de Niépce (1833), Daguerre continue seul les recherches qui aboutiront au daguerréotype, image obtenue avec de l'iodure d'argent, essentiellement grâce à deux opérations : la première utilisant un révélateur (la vapeur de mercure) et la seconde un fixateur (le chlorure de sodium).

Daguerre comprend – et c'est son idée de génie – qu'il faut à l'invention une consécration scientifique officielle. Sa visite à François Arago, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences et homme politique, allait être décisive pour l'avenir de la photographie. L'invention sera présentée au cours de la séance solennelle de l'Institut le 19 août 1839. L'État se porte propriétaire de la découverte, afin d'en «doter libéralement le monde entier». Daguerre et Isidore Niépce, héritier de son père,

reçoivent des pensions à vie. Mais la découverte devait être accompagnée d'un message simple : un seul inventeur. Dans la brochure de présentation de 1839, le texte de la *Notice* de Niépce est assorti de remarques critiques de Daguerre qui se révèlent sans fondement. L'examen des documents permet d'y voir l'influence d'Arago : pour s'imposer, semble penser Arago, un inventeur doit rehausser son propre rôle et dévaloriser celui des prédécesseurs. D'ailleurs, les recherches d'un autre Français contemporain, Hippolyte Bayard, sont passées sous silence.

Les péripéties qui accompagnent la «naissance officielle» de la photographie et son triomphe actuel remettent en lumière l'œuvre du pionnier : Niépce, inventeur de la photographie, a fait le premier pas vers la révolution des images. Il y a plus. Cet autre symbole de la modernité, l'ordinateur, doit beaucoup à la photogravure, dont Niépce est aussi l'inventeur.

Archimède, l'émission franco-allemande de vulgarisation scientifique d'ARTE, présente deux sujets sur «La reconstitution des procédés de Niépce», les 4 et 11 février 1997.

Jean-Louis MARIGNIER est chargé de recherche au CNRS (Laboratoire de physico-chimie des rayonnements de l'Université Paris-Sud). Il est lauréat de l'Académie des sciences (Grand Prix Kodak 1991) et a reçu la médaille de Salverte 1991 de la Société française de photographie.

Michel ELLENBERGER, ancien chercheur en physico-chimie biologique, est journaliste scientifique.

J.-L. MARIGNIER, *À la découverte des héliographies de Niépce*, *Le Photographe*, 1470, 13 (1989).

J.-L. MARIGNIER, *Mystères éclaircis de la plus ancienne photo au monde*, *Le Photographe*, 1480, 50 (1989).

J.-L. MARIGNIER, *Première reconstitution du deuxième procédé photographique au monde*, *Le Photographe*, 1499, 26 (1992).

J.-L. MARIGNIER, *Découverte de l'invention par Niépce et Daguerre d'un procédé photographique à base de colophane*, *Le Photographe*, 1524, 36 (1995).

J.-L. MARIGNIER, *Photochemistry of Asphaltene Films. A Study of the World's first photographic Process and its Invention*, in *J. Imag. Sci.*, 40, 123 (1996).

Le deutérium primordial

CRAIG HOGAN

Les noyaux de cette forme d'hydrogène furent créés dans les premiers instants de l'Univers. La détermination de sa quantité confirme l'existence de matière noire exotique.

Selon la théorie du Big Bang, l'Univers primordial était extraordinairement simple : il ne renfermait aucune structure de taille supérieure à celle des particules élémentaires. La théorie du Big Bang n'est fondée que sur la relativité générale, le Modèle standard de la physique des particules et les lois de la thermodynamique, mais elle semble décrire de manière presque parfaite l'évolution de l'Univers et, en particulier, ses premières étapes.

Les noyaux atomiques synthétisés pendant les premières minutes de l'Univers nous renseignent sur les événements du début de l'Univers, ainsi que sur sa composition et sa structure d'aujourd'hui. Le Big Bang a principalement engendré de l'hydrogène et de l'hélium. Le deutérium, isotope lourd de l'hydrogène, n'a été fabriqué qu'au début de l'Univers ; il révèle donc la jeunesse de celui-ci. Le rapport entre le nombre d'atomes de deutérium et le nombre d'atomes d'hydrogène dépend fortement de l'uniformité et de la quantité totale de matière nucléaire créée lors du Big Bang. Les mesures directes du deutérium présent dans des nuages de gaz anciens, effectuées ces dernières années, promettent un test précis de la théorie du Big Bang.

L'expansion de l'Univers aurait commencé voici 10 à 20 milliards d'années. Tout était alors plus compact et plus dense qu'aujourd'hui. La température de l'Univers âgé d'une seconde était supérieure à dix milliards de degrés, soit 1 000 fois la température au centre du Soleil. À cette température, on distingue mal les différentes formes de matière et d'énergie : les particules nucléaires, les neutrons et les protons, se transforment constamment les uns en les autres, en

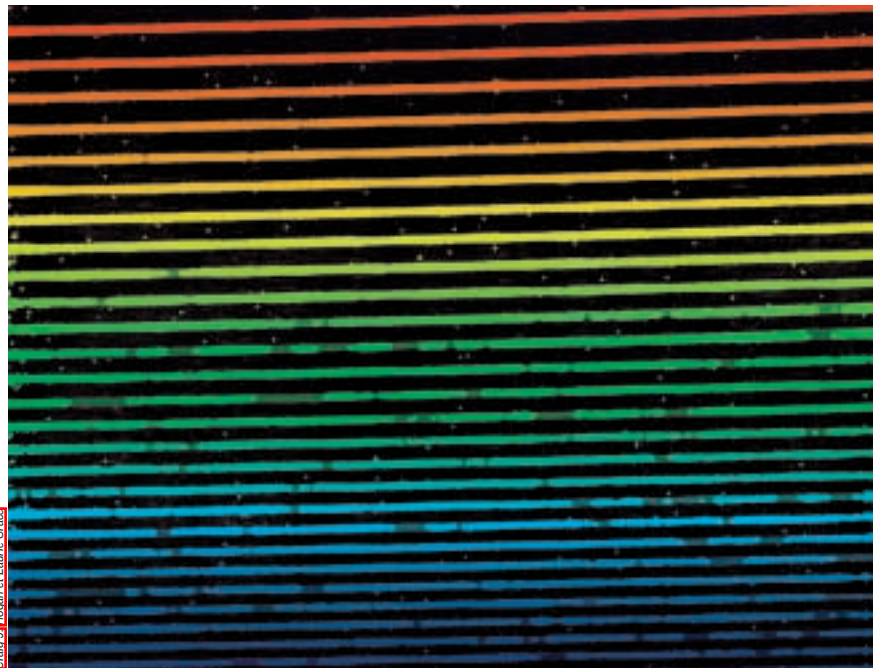
subissant de violentes collisions avec les neutrinos, les positons et les électrons. Comme les neutrons sont un peu plus massifs que les protons, le refroidissement de l'Univers a conduit à la formation d'un nombre supérieur de protons. Lorsque la température a été inférieure à dix milliards de degrés, les transmutations mutuelles ont cessé, et les protons ont été sept fois plus nombreux que les neutrons.

À la sortie de la fournaise primordiale

Quelques minutes après le Big Bang, lorsque la température était voisine d'un milliard de degrés, les protons et

les neutrons se sont associés en noyaux. Les paires composées d'un neutron et d'un proton étaient des noyaux de deutérium, les deutons, qui se combinèrent presque tous en noyaux d'hélium, composés de deux protons et de deux neutrons. Lorsque cet hélium primordial s'est formé, la densité de l'Univers était devenue trop faible pour que des fusions nucléaires ultérieures synthétisent des éléments plus lourds : la quasi-totalité des neutrons se sont retrouvés dans les noyaux d'hélium.

Sans neutrons pour vaincre les répulsions électriques, les protons restants n'ont pu se lier en noyaux d'atomes plus lourds : six protons sur sept subsistent aujourd'hui en tant que



1. LE TÉLESCOPE KECK (à droite), sur le Mauna Kea, à Hawaï, a recueilli la lumière d'un quasar lointain et l'a focalisée sur le détecteur d'un spectroscopie à haute résolution. Le spectre obtenu (ci-dessus) est zébré de lignes sombres, parce que des nuages de gaz, entre le quasar et la Terre, ont absorbé la lumière à des longueurs d'onde spécifiques. L'analyse de cette absorption révèle la présence de deutérium, un isotope lourd de l'hydrogène.

noyaux d'hydrogène isolés. Le modèle du Big Bang prédit donc que trois quarts de la masse de matière nucléaire de l'Univers se compose d'hydrogène, tandis que le reste est sous forme d'hélium. Cette prédiction s'accorde remarquablement bien avec les observations. L'hydrogène constituant le combustible principal des étoiles de l'Univers, sa prédominance est la cause fondamentale de la lumière des étoiles.

Au cours de la formation des noyaux d'hélium, approximativement un deuton sur 10 000 resta isolé. Une proportion encore inférieure fusionna en noyaux plus lourds que l'hélium, tel le lithium (tous les autres éléments chimiques, comme le carbone et l'oxygène, furent produits plus tard dans les étoiles). Les proportions précises d'hélium, de deutérium et de lithium formés dans cette nucléosynthèse primordiale ne dépendent que d'un paramètre : le rapport entre le nombre de baryons (les protons et les neutrons) et le nombre de photons. La valeur de ce rapport, noté η , reste constante au cours de l'expansion ; comme nous pouvons mesurer le nombre de photons (par l'étude du fond de rayonnement fossile), la valeur de η nous indique la quantité de matière nucléaire de l'Univers. Ce nombre est ainsi la clef de la compréhension de l'évolution cosmique, car nous pouvons le comparer à la quantité de matière observée dans les étoiles et dans le gaz des galaxies, ainsi qu'à la quantité plus grande de matière noire invisible.

Pour que le Big Bang ait produit le mélange observé d'éléments légers, la valeur de η doit être très petite : l'Univers contient moins de un baryon par

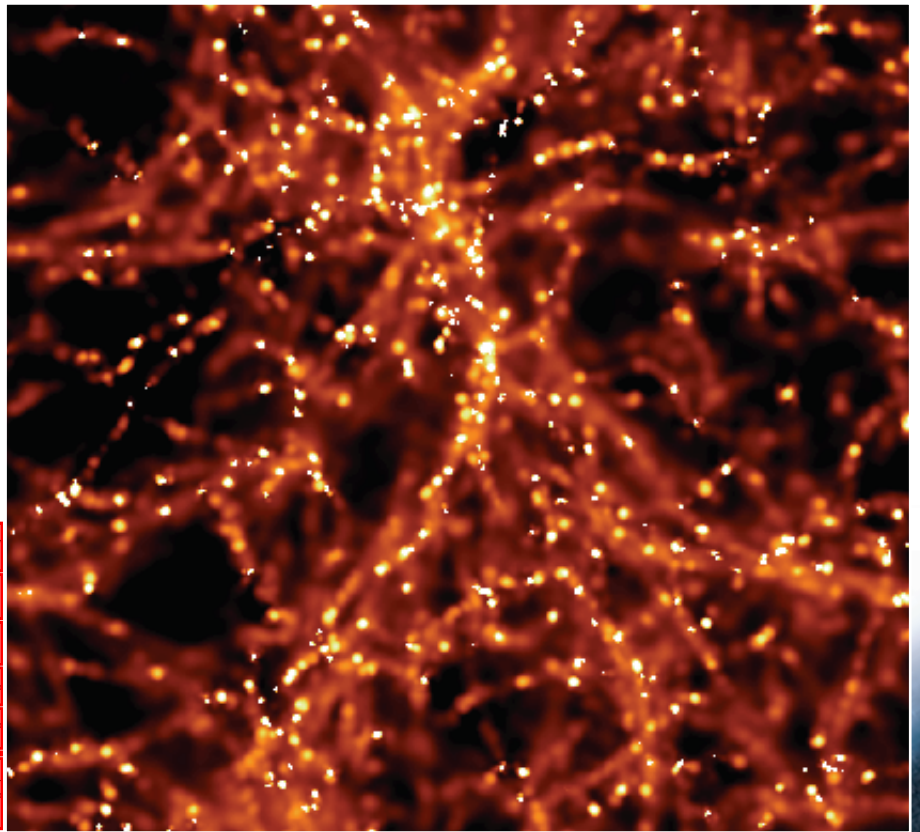


Photo: NASA / WMAP

milliard de photons. La température du rayonnement fossile donne directement le nombre de photons issus du Big Bang ; aujourd'hui, chaque centimètre cube d'espace contient 411 photons. Ainsi, il y aurait un peu moins de 0,4 baryon par mètre cube. Les cosmologistes débattent toutefois de la valeur exacte de η , les estimations variant d'un facteur dix. Le meilleur indicateur de η est la concentration en éléments légers pri-

2. LA MESURE DE LA COMPOSITION de l'Univers primordial est difficile, parce que la matière a subi des transformations au sein des étoiles. Néanmoins, on obtient une telle mesure en étudiant des nuages éclairés, de l'arrière, par des quasars. Ces derniers se trouvent à des distances de plusieurs milliards d'années-lumière, à la frontière de l'Univers observable. Lorsque cette lumière traverse des nuages de gaz quasi primordial, peut-être en périphérie d'une galaxie en formation (une simulation d'un nuage de gaz primordial est représenté dans le médaillon, à gauche), l'hydrogène et le deutérium de ces nuages absorbent des rayonnements à des longueurs d'onde caractéristiques. Ces absorptions, mesurables par les télescopes terrestres, révèlent la proportion de deutérium.

a été émise lorsque l'Univers avait moins d'un dixième de son âge actuel. En chemin, cette lumière traverse les nuages «primordiaux» situés entre les quasars et nous, de sorte que son absorption révèle la composition du matériau absorbant. Dans certains de ces nuages, on a mesuré une concentration en carbone et en silicium (produits de la fusion nucléaire dans les étoiles) 1 000 fois inférieure à celle que l'on mesure dans l'espace proche : c'est l'indication que ce gaz n'a pas été beaucoup recyclé et que les nuages sont réellement «primordiaux», avec une composition proche de celle qui prévalait quelques minutes après le Big Bang.

L'examen d'objets lointains procure un autre avantage. La composante principale de ces nuages, l'hydrogène atomique, absorbe la lumière à des longueurs d'onde ultraviolettes particulières, les raies de Lyman. Chacune de ces raies d'absorption (ainsi nommées parce qu'elles forment des raies sombres dans le spectre) correspond à la longueur d'onde d'un photon ayant exactement l'énergie requise pour exciter l'électron d'un atome d'hydrogène vers un niveau d'énergie supérieur particulier. Ces raies ultraviolettes ne sont pas observables du sol, en raison de l'absorption atmosphérique à ces longueurs d'onde (l'observation du ciel ultraviolet nécessite des télescopes embarqués sur satellite). Même la raie de plus grande longueur d'onde et la plus intense, la raie Lyman alpha, est à une longueur d'onde de 121,5 nanomètres (milliardièmes de mètre), hors des fenêtres atmosphériques. Fort heureusement, l'expansion de l'Univers allonge les longueurs d'onde des photons qui atteignent la Terre : plus ces photons ont été émis il y a longtemps,

La détermination de la quantité primordiale du deutérium n'est pas facile, car l'Univers a beaucoup évolué. Les astronomes mesurent la quantité de deutérium dans des nuages d'hydrogène atomique, entre les étoiles de notre Galaxie, mais comme le deutérium est facilement détruit, les résultats obtenus ne sont pas représentatifs de la valeur primordiale. Nous vivons dans une galaxie d'âge moyen, dont le gaz a subi une importante modification chimique tout au long de ses dix milliards d'années d'histoire. Le deutérium est détruit très rapidement dans les étoiles, même dans leurs couches externes et alors que les étoiles sont encore en formation. Comme les étoiles éjectent leurs enveloppes en mourant, le gaz de notre Galaxie a ainsi subi de nombreux recyclages. Par conséquent, l'observation des nuages de gaz proches ne peut fournir qu'une limite inférieure à la quantité du deutérium primordial.

Quasars et nuages de gaz

L'idéal serait de trouver de la matière réellement primordiale, qui n'aurait jamais évolué chimiquement. Cette matière existe : ce sont des nuages de gaz lointains qui ne se sont pas encore condensés en galaxies. La lumière qui provient des quasars brillants, les objets les plus anciens que nous puissions voir,

primordiaux, en particulier celle du deutérium. Multiplier η par 5, par exemple, conduit à diviser par 13 la quantité de deutérium produite.

La présence actuelle de deutérium impose une limite supérieure pour η : le Big Bang constitue la seule source de deutérium dans l'Univers et les étoiles ne font que le détruire. Cet isotope est comme du charbon non consommé dans un poêle : le feu s'est éteint avant qu'il ne soit complètement brûlé. La nucléosynthèse primordiale n'a duré que quelques minutes, mais la combustion nucléaire dans les étoiles dure depuis des milliards d'années. C'est donc dans les étoiles que le deutérium a été transformé en hélium ou en éléments plus lourds, et tout le deutérium que nous retrouvons aujourd'hui est un vestige du Big Bang, jusqu'aux quelques atomes de deutérium qui occupent la place d'atomes d'hydrogène dans une molécule d'eau de mer sur 10 000.

Le deutérium, une clé pour la cosmologie

Les astrophysiciens ont identifié trois groupes d'isotopes (noyaux qui diffèrent par leur nombre de neutrons) qui constituent la matière ordinaire, celle de la Terre, des étoiles et des galaxies, et ils ont établi leur origine.

Premièrement, l'hydrogène et une grande partie de l'hélium 4, noyaux de loin les plus nombreux, ainsi que le deutérium, l'hélium 3 et le lithium 7 sont issus de la nucléosynthèse primordiale : peu de temps après le Big Bang, les réactions de fusion thermonucléaire synthétisèrent ces premiers noyaux. Deuxièmement, le lithium, le béryllium et le bore sont d'une extrême rareté ; ils sont fabriqués dans le milieu interstellaire par brisure de noyaux plus lourds tels le carbone et l'oxygène. Enfin, tous les autres noyaux, du carbone à l'uranium, sont engendrés au cours des différentes phases de l'évolution stellaire, par la fusion thermonucléaire.

Le deutérium est particulier, car, contrairement aux deux isotopes de l'hélium et au lithium 7, qui peuvent être partiellement produits ou détruits dans les étoiles, il est si fragile qu'il ne peut subsister ni être fabriqué dans ces objets. Aussi la proportion de deutérium par rapport à l'hydrogène permet-elle de préciser la physique du Big Bang, à condition bien sûr de se rapprocher au mieux de sa valeur primordiale.

Cette prouesse vient d'être accomplie grâce à la mesure de raies d'absorption du deutérium, révélatrices de nuages intergalactiques lointains, interposés entre les quasars et nous. Aujourd'hui, deux séries de mesures, effectuées au moyen du télescope Keck, donnent des résultats différents d'un facteur dix : une valeur haute d'environ 2×10^{-4} et une valeur basse de $2,3 \times 10^{-5}$.

Que révèlent ces deux valeurs sur le déroulement du Big Bang, d'une part, et sur la nature de la matière noire (substance n'émettant ni n'absorbant aucune onde électromagnétique), d'autre part ?

La théorie du Big Bang standard prévoit trois devenir possibles pour notre Univers. Si la densité de matière est suffisante, la gravitation agira comme une force de rappel qui ralentira, puis inversera le mouvement d'expansion général. La phase de contraction globale se soldera par un effondrement gigantesque. Inversement, si la densité est insuffisante pour freiner et inverser le mouvement d'expansion, l'Univers continuera indéfiniment à se dilater. Enfin, si la matière exerce une force de rappel qui compense exactement l'expansion générale, cette dernière ralentira indéfiniment. Cette densité de matière, calculée dans le cadre de la théorie du Big Bang, est de quelques protons par mètre cube : c'est la densité critique.

Les astrophysiciens disposent de plusieurs méthodes pour déterminer le paramètre de densité de l'Univers, défini comme le rapport de la densité de matière à la densité critique. Ils estiment d'abord la densité de matière lumineuse, en additionnant la luminosité de toutes les étoiles dans les régions centrales des galaxies, puis en multipliant cette luminosité totale par le rapport moyen entre la masse des galaxies et leur luminosité, établi sur un vaste échantillon de galaxies. Par cette méthode, les

astrophysiciens ont calculé que la densité de matière lumineuse dans l'Univers est égale à seulement 0,4 pour cent de la densité critique.

On évalue la densité de matière de manière plus complète par l'examen de ses effets gravitationnels, en considérant le mouvement des galaxies au sein des amas et des groupes de galaxies. Selon cette méthode dynamique, on déduit les masses des groupes et des amas de galaxies à partir du mouvement des galaxies individuelles en supposant que ces amas sont liés par la gravitation. On trouve ainsi que la densité «dynamique» est comprise entre 20 et 30 pour cent de la densité critique.

Enfin, on estime de manière indépendante la densité de la matière ordinaire, dite baryonique (constituée de protons et de neutrons), en analysant la nucléosynthèse primordiale dans le cadre de la théorie standard du Big Bang. Bien qu'elle soit théorique, cette évaluation est, comme on le verra, compatible avec l'ensemble des observations disponibles.

La nucléosynthèse primordiale des éléments légers (hydrogène, deutérium, hélium 3, hélium 4 et lithium 7) constitue, avec l'expansion de l'Univers et le rayonnement cosmologique fossile, l'un des piliers de la théorie du Big Bang. Les proportions relatives des éléments légers, réparties sur neuf ordres de grandeurs (un atome d'hélium 4 pour dix atomes d'hydrogène ; un atome de lithium 7 pour dix milliards d'atomes d'hydrogène) sont en effet expliquées de manière cohérente par la théorie du Big Bang et par aucune autre, ce qui en assure, à cet égard, la prééminence.

La mesure du deutérium, dans le milieu interstellaire local, indique une proportion par rapport à l'hydrogène égale à $1,6 \times 10^{-5}$ (observation effectuée par le *Télescope spatial Hubble*). Sa proportion dans la nébuleuse protosolaire a été déduite des valeurs mesurées dans le vent solaire et les météorites ($2,6 \times 10^{-5}$), et dans l'atmosphère de Jupiter (3×10^{-5} , résultat obtenu par la sonde *Galileo*). Cependant, les mesures qui se rapprochent le plus de la valeur primordiale sont, sans conteste, celles qui sont décrites par Craig Hogan.

Le deutérium est détruit dans les étoiles lorsque la température atteint 600 000 degrés. Le noyau de deutérium capte alors un proton et se transforme en un noyau d'hélium 3. Aussi, sa quantité n'a fait que décroître depuis la nucléosynthèse primordiale, suite à la transformation incessante du gaz en étoiles, au cours de l'évolution des galaxies.

Le cas de l'hélium 3 est complexe, car certaines étoiles le produisent et d'autres le détruisent. Selon les modélisations stellaires utilisées, on trouve des quantités d'hélium 3 produites très différentes. Cependant, la proportion primordiale de cet isotope dépend peu des conditions physiques de la nucléosynthèse du Big Bang. Par ailleurs, nous disposons de deux estimations : la proportion d'hélium 3 dans la nébuleuse protosolaire a été évaluée à $1,5 \times 10^{-5}$ (composition d'il y a 4,5 milliards d'années), tandis que sa proportion dans le milieu interstellaire proche est égale à $2,2 \times 10^{-5}$ (composition actuelle), ce qui indiquerait que cette proportion a peu varié au cours du temps.

La quantité d'hélium 4 croît au cours de l'évolution des galaxies, car cet isotope est produit par les étoiles. La mesure de sa proportion dans des milieux variés n'est donc qu'une limite supérieure de la valeur primordiale. La fraction de masse de l'hélium 4 primordial (nombre de grammes d'hélium par gramme de matière baryonique) est estimée entre 0,23 et 0,24.

La proportion de lithium, mesurée à des fins cosmologiques dans l'atmosphère des étoiles les plus vieilles de la Galaxie (étoiles pauvres en éléments lourds), est assez bien déterminée : elle est égale à environ $1,6 \times 10^{-10}$.

Les quantités de ces isotopes produits lors de la nucléosynthèse primordiale dépendent du paramètre cosmologique fondamental η , rapport du nombre de baryons et du nombre de photons (voir le graphique). Ce paramètre se conserve depuis les temps primordiaux, car le numérateur et le dénominateur se conservent séparément.

Le paramètre de densité baryonique Ω_b est le quotient de la densité baryonique par la densité critique. Les paramètres Ω_b et η sont reliés par l'équation $\Omega_b = 0,0075 \times 10^{10} \times \eta$ (pour un taux d'expansion de l'Univers égal à 70 kilomètres par seconde et par mégaparsec). Par la suite, on verra que le nombre de familles de neutrinos légers intervient aussi dans l'analyse, car l'abondance de l'hélium 4 y est sensible.

Examinons maintenant les conséquences des deux valeurs de deutérium sur les paramètres physiques du Big Bang. Si la quantité de deutérium, rapportée à celle de l'hydrogène, est égale à $2,3 \times 10^{-5}$, comme l'indiquent les mesures de David Tytler et de ses collègues, η vaut environ 7×10^{-10} , ce qui correspond à un paramètre de densité baryonique Ω_b égal à 0,05. La fraction de masse de l'hélium 4 est égale à 0,25, valeur supérieure à celle qui est mesurée, à moins de supposer qu'il n'existe que deux familles de neutrinos légers. Enfin, la proportion de lithium est comprise entre 5×10^{-10} et 6×10^{-10} , ce qui s'expliquerait uniquement si la destruction du lithium 7 dans l'enveloppe des étoiles était quatre fois supérieure à ce qu'elle est selon les théories d'évolution stellaire standards.

Si maintenant, la quantité de deutérium, rapportée à celle de l'hydrogène, est égale à 2×10^{-4} , comme l'estime C. Hogan et ses collègues, η est égal à environ 2×10^{-10} et Ω_b à 0,015. La fraction de masse de l'hélium 4, égale à 0,23, est alors en accord avec les évaluations standards. Le nombre de famille de neutrinos légers

est de trois, conformément aux mesures de physique des particules effectuées au CERN. Enfin, la proportion de lithium formé lors de la nucléosynthèse primordiale est du même ordre que celle observée dans les vieilles étoiles du halo galactique.

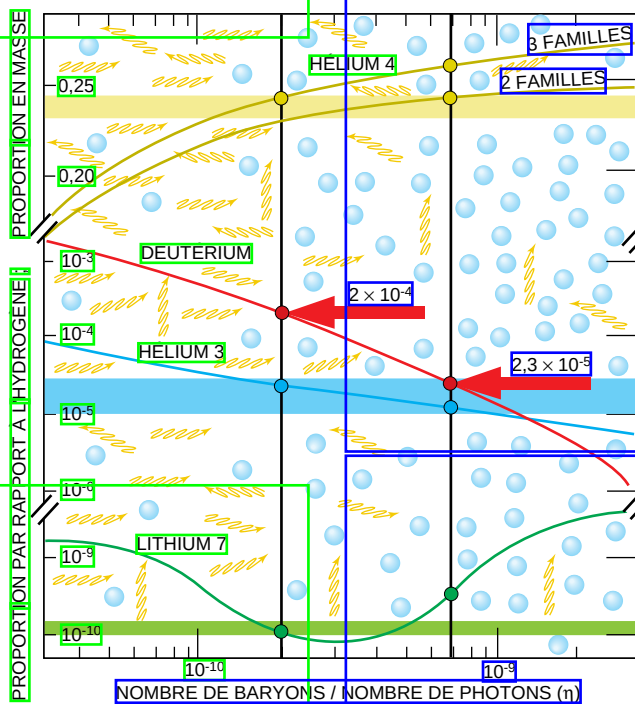
Pour finir, examinons les conséquences de ces mesures sur la nature de la matière noire. En comparant la densité de matière révélée par la lumière (0,4 pour cent de la densité critique) avec celle déduite de la théorie du Big Bang (1,5 à 5 pour cent de la densité critique), on constate que, quelle que soit la proportion de deutérium, la majorité de la matière ordinaire n'émet pas de photons. Où se cache la matière sombre baryonique? Les possibilités sont nombreuses : elles pourraient être dans les naines brunes, ces «étoiles ratées», objets insuffisamment massifs pour amorcer des réactions thermonucléaires, ou encore dans de grosses planètes comme Jupiter, qui émettent peu de lumière. Les cadavres d'étoiles pourraient aussi constituer cette matière sombre, sous forme de naines blanches, résidus des étoiles de petite masse comme le sera notre Soleil dans cinq milliards d'années, ou sous forme d'étoiles à neutrons et de trous noirs, vestiges d'étoiles massives et très massives.

Si l'on compare maintenant la densité de matière baryonique déduite de la théorie du Big Bang à la densité de matière dynamique (20 à 30 pour cent de la densité critique), on conclut immédiatement que la matière nucléaire est négligeable par rapport à celle que l'on décèle indirectement grâce aux mouvements des galaxies dans les amas. La grande majorité de la matière qui constitue notre Univers n'est pas

de la même nature que celle qui nous compose. Les deux tiers au moins de l'Univers seraient sous forme inconnue. Cette proportion s'élève encore si l'on considère que l'Univers a la densité critique, comme semblent l'indiquer les dernières théories cosmologiques.

L'existence de la matière noire est l'une des découvertes les plus importantes de notre fin de siècle. Les atomes ne seraient que l'écume de l'Univers. Aussi les astrophysiciens cherchent-ils maintenant à déterminer la nature et la répartition de la matière noire baryonique et de la matière noire exotique.

Elisabeth VANGIONI-FLAM, Inst. d'astrophys. de Paris et Michel CASSÉ, Service d'astrophysique du CEA, Saclay



Les deux récentes estimations de la proportion de deutérium primordial (flèches rouges) diffèrent notablement. À partir de chacune de ces mesures, on détermine la quantité des autres éléments légers produits lors de la nucléosynthèse primordiale (points de couleur à la verticale de chacune des estimations). Seule la valeur haute est compatible avec l'ensemble des observations (les bandes jaune, bleue et verte indiquent les mesures des différents éléments légers dans des sites primordiaux, avec les incertitudes de mesures).

plus leur longueur d'onde est décalée. Les raies d'absorption de l'hydrogène présentes dans des nuages lointains se retrouvent ainsi dans le spectre visible, observable du sol.

La raie Lyman alpha est présente des centaines de fois dans le spectre d'un quasar. Chacune provient de l'absorption de la lumière du quasar par un nuage particulier, situé entre le quasar et la Terre. Le décalage vers le rouge est donc différent pour chaque nuage, ainsi que la longueur d'onde de la raie. Le spectre résultant contient ainsi une tranche d'histoire cosmique, comme les anneaux de croissance d'un arbre : il révèle l'histoire de la fragmentation du gaz, le passage d'un Univers homogène

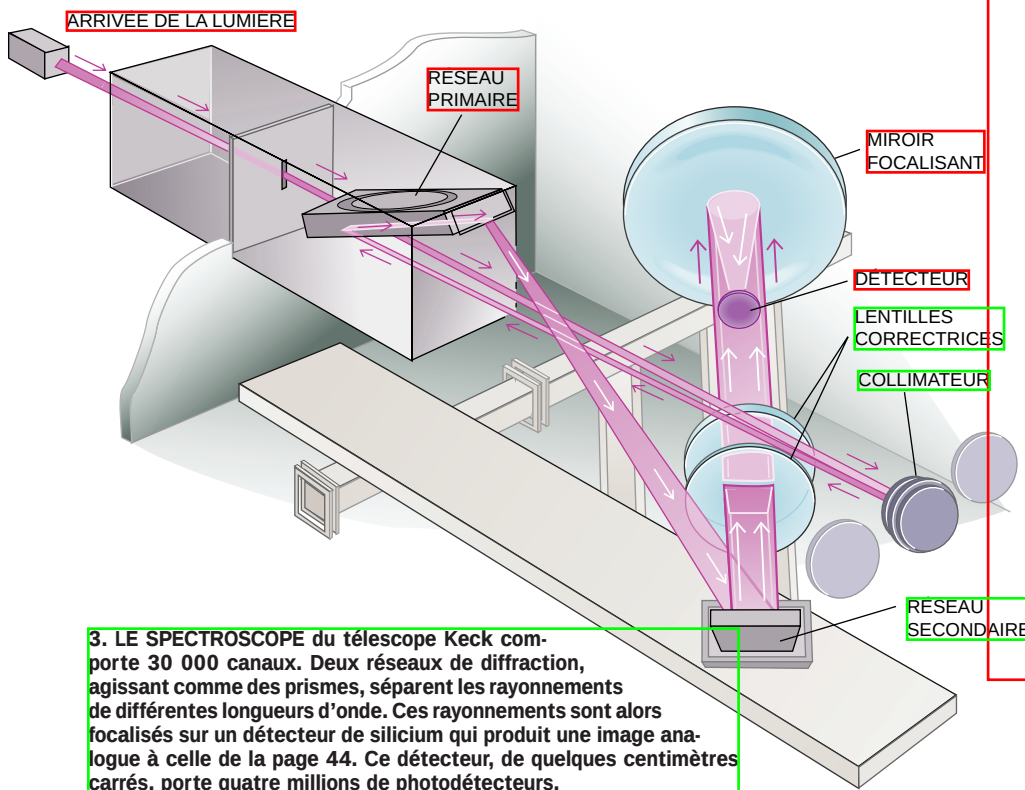
à un Univers hétérogène formé de milliards de galaxies. De tels spectres sont une autre manière de tester le caractère primordial de la matière absorbante : la théorie du Big Bang prédit que tous les nuages de gaz de l'Univers très jeune ont une composition semblable. La mesure de la composition de différents nuages, très éloignés de nous et très éloignés les uns des autres, testera directement cette uniformité cosmique primordiale.

Pour certains de ces nuages, on déduit du spectre des quasars à la fois la quantité d'hydrogène et celle de deutérium. En effet, la masse supérieure du noyau de deutérium accroît l'énergie nécessaire aux transitions électroniques

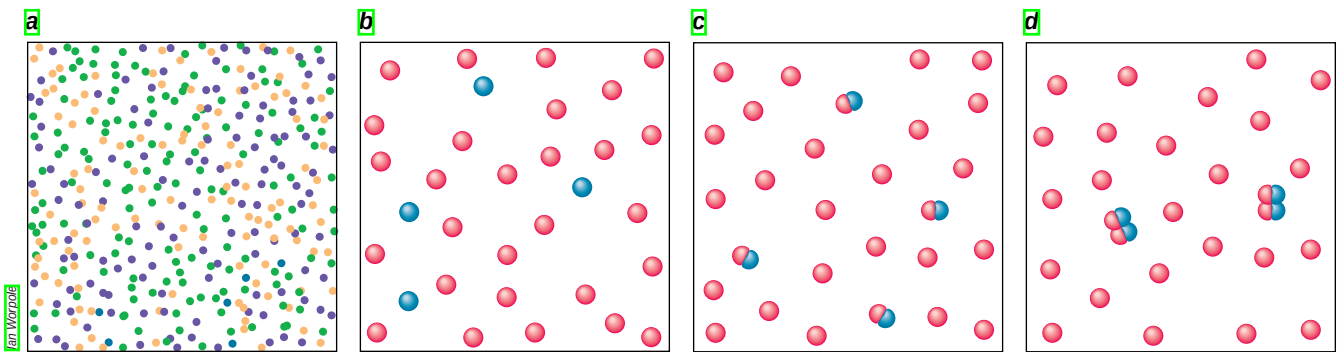
d'une partie pour 4 000, de sorte que toutes les raies sont décalées vers l'extrémité bleue du spectre. Dans les mesures spectrographiques d'un nuage « primordial », essentiellement composé d'hydrogène, le signal provenant de l'absorption par le deutérium est comme un « écho » faible, décalé vers le bleu, du signal produit par l'hydrogène.

Les spectres des nuages révèlent également les vitesses et les températures des atomes, grâce au phénomène d'effet Doppler : les atomes en mouvement à des vitesses différentes absorbent la lumière à des longueurs d'onde légèrement différentes, parce que la longueur d'onde des rayonnements dépend du mouvement relatif de l'émetteur et du récepteur (la sirène d'une ambulance est plus aiguë quand elle approche de nous, plus grave quand elle s'éloigne). Aux températures des nuages, les atomes d'hydrogène se déplacent à des vitesses qui atteignent dix kilomètres par seconde, décalant la longueur d'onde d'une partie pour 30 000 ; parce qu'ils sont deux fois plus lourds, les atomes de deutérium à la même température n'atteignent que des vitesses de sept kilomètres par seconde, et la répartition de leurs vitesses est légèrement différente. Les spectrographes modernes distinguent ces différentes vitesses thermiques et mesurent les mouvements collectifs de plus grande ampleur.

Bien que les spectrographes puissent facilement discerner les raies de l'hydrogène et celles du deutérium, la divi-



3. LE SPECTROSCOPE du télescope Keck comporte 30 000 canaux. Deux réseaux de diffraction, agissant comme des prismes, séparent les rayonnements de différentes longueurs d'onde. Ces rayonnements sont alors focalisés sur un détecteur de silicium qui produit une image analogue à celle de la page 44. Ce détecteur, de quelques centimètres carrés, porte quatre millions de photodétecteurs.



4. LA NUCLEOSYNTHESE, ou formation des noyaux atomiques, commença quelques instants après le Big Bang, lors du refroidissement de l'Univers : les quarks (a) s'agglutinent en protons et en neutrons (b) ; puis les protons (en rouge) et les neutrons (en bleu) formèrent des paires nommées deutons (les noyaux de deu-

térium). Toutefois, les protons étant plus nombreux que les neutrons, la plupart demeurèrent isolés et devinrent des noyaux d'hydrogène (c). Presque tous les deutons se combinèrent en noyaux d'hélium (d), et seuls les quelques noyaux de deutérium restants subsistent aujourd'hui.

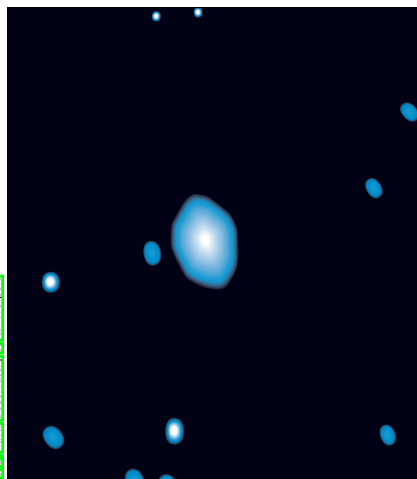
sion de la lumière d'un quasar lointain en 30 000 canaux spectroscopiques laisse très peu d'intensité dans chaque canal. Pendant plus de 20 ans, cette lumière est restée invisible. La technique fonctionne aujourd'hui grâce à des détecteurs améliorés, plus efficaces, au télescope Keck de Hawaï (son miroir a un diamètre de dix mètres) et à des spectrographes à haute résolution et haut débit, comme l'instrument HIRES du Keck.

En attendant la lumière

Après de nombreuses tentatives infructueuses à l'aide de plus petits télescopes, mes collègues Antoinette Songaila et Lennox Cowie, de l'Université d'Hawaï, ont pu observer un quasar à l'aide du télescope Keck, en novembre 1993. Ils ont pointé l'instrument vers le quasar 0014+813, célèbre parmi les astronomes pour son éclat (pendant plusieurs années, il fut l'objet le plus brillant connu dans l'Univers).

On savait qu'un nuage de gaz primordial se trouvait devant ce quasar. Le premier spectre enregistré, après quelques heures seulement d'observation, révéla la présence du deutérium cosmique : ce spectre comportait les traces de l'absorption par de l'hydrogène en mouvement, et un écho presque parfait de la raie Lyman alpha, décalé vers le bleu par le deutérium. L'intensité de ce second signal résulterait de la présence de deux atomes de deutérium pour 10 000 atomes d'hydrogène. Ce résultat a été confirmé par Robert Carswell et ses collègues de l'Université de Cambridge, qui ont utilisé le télescope Mayall, de quatre mètres de diamètre, à Kitt Peak, en Arizona. Les deux observations indépendantes confirment que la répartition des vitesses du deutérium est, comme prévu, exceptionnellement étroite.

Une partie de l'absorption observée pourrait résulter de l'interposition fortuite d'un petit nuage d'hydrogène qui s'éloignerait de nous à 82 kilomètres par seconde plus lentement que le nuage principal. Dans ce cas, le deutérium serait moins abondant que nous ne l'avons calculé. Bien que la probabilité d'une telle coïncidence soit faible, nous devons considérer notre estimation comme préliminaire et étudier, avec la même méthode, les nuages situés devant d'autres quasars. À ce jour, huit nuages ont été étudiés.



5. LE QUASAR 0014+813 est un des objets du cosmos les plus brillants que nous connaissons. Il apparaît ici sur une image prise par un radiotélescope. L'absorption de la lumière émise par ce quasar, à la limite de l'Univers observable, fournit les premières mesures du deutérium primordial.

L'un des résultats les plus intrigants a été obtenu par David Tytler et Scott Burles, de l'Université de San Diego, et par Xiao-Ming Fan, de l'Université Columbia : dans le nuage qu'ils ont étudié, la quantité de deutérium semble dix fois inférieure à celle que nous avons calculée. Pourquoi cet appauvrissement ? Le deutérium a-t-il été brûlé dans des étoiles ou la production de deutérium a-t-elle été moins uniforme que ne le prédit le Big Bang (voir l'encadré) ?

Voir la matière sombre

Si notre valeur élevée est correcte, l'Univers contient bien deux baryons pour dix milliards de photons, en accord avec la théorie du Big Bang. Avec cette proportion de baryons, les prédictions du Big Bang sont également cohérentes avec les quantités de lithium dans les étoiles les plus vieilles et avec les estimations de l'hélium primordial observé dans des galaxies proches pauvres en éléments lourds. La confirmation de notre mesure serait remarquable : elle indiquerait que les cosmologistes comprennent ce qui s'est passé une seconde à peine après le commencement de l'expansion de l'Univers, et que l'histoire de la matière aux grandes distances ressemble à celle de la matière proche, conformément au modèle le plus simple de l'Univers.

L'estimation de η que donne l'observation des nuages est conforme à ce que nous observons aujourd'hui dans

l'Univers : en estimant la densité totale de photons de l'Univers et en la rapportant à cette valeur de η , on calcule que l'Univers contient un atome par dix mètres cubes d'espace. C'est à peu près ce que l'on trouve quand on détermine directement le nombre d'atomes de l'Univers en tenant compte de toute la matière présente sous la forme de gaz, d'étoiles, de planètes ou de poussières. Ainsi l'Univers ne contiendrait-il pas beaucoup de baryons invisibles. Pourtant l'observation des galaxies et de leur halo indique que leurs mouvements ne sont explicables que si beaucoup de matière est invisible (au moins dix fois la densité moyenne des baryons visibles). La quantité élevée de deutérium que nous avons mesurée indique que cette matière invisible n'est pas la matière atomique ordinaire.

Les cosmologistes ont envisagé de nombreuses possibilités. Par exemple, la théorie du Big Bang prédit que l'Univers contient presque autant de neutrinos que de photons. Si chacun possédait une masse de quelques milliardièmes de celle du proton (soit quelques électronvolts), la masse totale des neutrinos serait presque égale à celle des baryons. Il se peut aussi que l'Univers ait initialement contenu une ou plusieurs particules exotiques. Quoi qu'il en soit, le modèle du Big Bang, conforté par les observations, fournit un cadre pour prédire les conséquences de ces nouvelles idées pour l'astrophysique.

Craig HOGAN dirige le département d'astrophysique de l'Université de Washington, à Seattle.

Steven WEINBERG, *Les trois premières minutes de l'Univers*, Éditions du Seuil, 1978.

F.H. SHU, *The Physical Universe : An Introduction to Astronomy*, University Science Books, Mill Valley, Californie, 1982.

J. SILK, *A Short History of the Universe*, W.H. Freeman and Company, 1994.

A. SONGAILA, L.L. COWIE, C.J. HOGAN et M. RUGERS, *Deuterium Abundance and Background Radiation Temperature in High-Redshift Primordial Clouds*, in *Nature*, vol. 368, pp. 599-604, 14 avril 1994.

Cosmic Abundances, ASP Conference Series, vol. 99, sous la direction de S.S. Holt et G. Sonneborn, Astronomical Society of the Pacific, 1996.

C.J. HOGAN et P.J.E. PEEBLES, *The History of the Galaxies*, in *Nature*, vol. 381, pp. 489-495, 6 juin 1996.

La menace permanente des armes biologiques

LEONARD COLE

Les États et les terroristes fourbissent aujourd'hui des armes biologiques. Des contrôles plus stricts devront les dissuader de les utiliser.

Le 20 mars 1995, des terroristes tuaient 12 personnes et en blessaient 5 500 en libérant du sarin dans le métro de Tokyo. Cette attaque – dans l'un des pays les plus sûrs du monde! – aurait pu tuer des milliers de personnes si le mélange utilisé avait été plus pur.

Le sarin a été produit pour la première fois en Allemagne, en 1930. Une seule goutte mise au contact de la peau ou inhalée tue une personne en quelques minutes. Comme toutes les substances s'attaquant au système nerveux, le sarin bloque l'action de l'acétylcholinestérase, une enzyme nécessaire à la transmission de l'influx nerveux.

La secte responsable de l'attaque au sarin, Aum Shinrikyo («Vérité suprême»), cherchait aussi à mettre au point des agents biologiques. C'est une perspective effrayante, car, contrairement aux agents chimiques, les bactéries et les virus sont contagieux et se reproduisent.

Certains agents biologiques invalident les victimes, mais d'autres les tuent. Le virus *Ebola*, par exemple, tue jusqu'à 90 pour cent des personnes qu'il infecte en un peu plus d'une semaine : il provoque la dissolution des tissus conjonctifs, ainsi que des hémorragies ; au stade terminal, les victimes infectées sont prises de convulsions, projettent du sang contaminé tout autour d'elles, tandis qu'elles sont prises de convulsions, tremblent et se débattent dans leur agonie.

On ne dispose d'aucun traitement pour soigner une infection par le virus *Ebola*, et l'on connaît mal les mécanismes de contamination : on ignore si

la transmission se fait par contact avec les victimes, avec leur sang, avec leurs fluides corporels ou avec les corps morts, ou même si l'air que l'on respire est lui-même contaminant. Au cours de la dernière épidémie, au Zaïre, les autorités sanitaires ont imposé des mesures d'isolement dans certaines régions, jusqu'à ce que la maladie s'éteigne.

On s'effraie que des individus ou des États envisagent d'utiliser de tels virus comme arme. En octobre 1992, Shoko Asahara, le chef de la secte Aum, est allé au Zaïre avec 40 de ses adeptes. Officiellement ils partaient aider les victimes d'*Ebola*, mais une enquête du Sénat américain a montré qu'ils cherchaient à se procurer des échantillons du virus, pour les cultiver et les utiliser au cours d'attentats biologiques.

Aux États-Unis aussi, des personnes ont tenté de se procurer des organismes dangereux afin de fabriquer des armes. Le 5 mai 1995, six semaines après l'attaque dans le métro de Tokyo, Larry Harris, un laborantin de l'Ohio, commanda à un laboratoire spécialisé la bactérie responsable de la peste bubonique et s'est ainsi procuré trois ampoules de la bactérie *Yersinia pestis*.

L. Harris fut découvert, parce que, quatre jours après avoir passé sa commande, il téléphona pour demander pourquoi il n'avait encore rien reçu.

1. PENDANT LA GUERRE DU GOLFE, en 1991, des voyageurs ont dû porter des masques à gaz dans l'aéroport de Tel Aviv, en raison des menaces d'armes biologiques et chimiques que faisait peser l'Irak.



Cette impatience et son apparente ignorance des techniques de laboratoire étonnèrent les responsables du laboratoire, qui avertirent la police. On découvrit que L. Harris était membre d'une association raciste. Pour obtenir la bactérie de la peste, Harris avait seulement eu besoin d'une carte de crédit et d'une fausse lettre à en-tête. Promulguée en avril 1996, en partie à la suite de cet incident, une loi américaine antiterroriste exige maintenant du Centre de contrôle et de prévention des maladies un suivi plus minutieux lors de l'envoi d'agents infectieux.

Qu'aurait fait L. Harris avec les bactéries? Il affirma qu'il voulait entre-

prendre des recherches pour lutter contre l'action des rats irakiens porteurs de «supergermes». S'il avait voulu obtenir un arsenal biologique, cela n'aurait pas été très difficile: à raison d'une division toutes les 20 minutes, une seule bactérie engendre un milliard de descendants en une dizaine d'heures. Or, pour certaines maladies, telles que l'anthrax (la maladie du charbon), l'inhalation de quelques milliers de bactéries est fatale.

Kathleen Bailey, une ancienne directrice adjointe de l'Agence américaine pour le contrôle des armements et pour le désarmement, est convaincue qu'un arsenal biologique complet pourrait être fabriqué, avec 50 000 francs de

matériel, dans une pièce de cinq mètres sur cinq. En effet, on peut cultiver, sans grands risques, des centaines de milliards de bactéries avec un équipement aussi peu élaboré qu'un fermenteur pour la bière et un milieu de culture contenant des protéines, un masque à gaz et une combinaison de protection en matière plastique.

Heureusement, le terrorisme biologique reste très limité. En septembre 1984, par exemple, 750 personnes ont été prises de malaises après avoir déjeuné dans divers restaurants d'une ville de l'Oregon. Ma Anand Sheela, qui fut jugée pour cet empoisonnement en 1986, avoua qu'avec d'autres membres d'une secte locale, elle avait



répandu des salmonelles sur les salades présentées sur des buffets, dans quatre restaurants de la ville ; les bactéries avaient été cultivées dans les laboratoires du ranch de la secte. Après deux ans et demi de prison, M.A. Sheela, qui avait été l'assistante du gourou de la secte, fut libérée et expulsée vers l'Europe.

D'autre part, les militaires ont peu employé les armes biologiques. Le premier de ces usages semble avoir eu lieu en 1345-1346, en Crimée, alors que la peste ravageait les rangs des attaquants mongols qui assiégeaient Caffa, un port de la mer Noire. Au moyen de trébuchets, les Mongols envoyèrent des cadavres pestiférés par-dessus l'enceinte de la ville ; la peste se répandit dans Caffa, puis, de ce port, vers les autres ports de la Méditerranée. Plus tard, en Amérique, un officier britannique distribua à des Indiens des couvertures contaminées provenant d'un centre de traitement de la variole, afin de déclencher une épidémie parmi les tribus indiennes. Enfin, dans les années 1930, des bactéries de la peste ont été utilisées par le Japon contre la Chine.

Aujourd'hui, un paradoxe se dessine : le nombre des États ayant ratifié les conventions internationales de destruction des armes chimiques et biologiques est plus important qu'il ne l'a jamais été, mais, simultanément, celui des États soupçonnés de fabriquer ces armes biologiques augmente. En 1980, seule l'Union soviétique avait été accusée par les États-Unis de violer la convention de 1972, qui interdit toute possession ou fabrication d'armes biologiques.

En 1989, la CIA estimait qu'une dizaine de pays construisaient des armes biologiques. En 1995, ce nombre atteignait 17 : l'Iran, l'Irak, la Libye, la Syrie, la Corée du Nord, Taiwan, Israël, l'Égypte, le Vietnam, le Laos, Cuba, la Bulgarie, l'Inde, la Corée du Sud, l'Afrique du Sud,

la Chine et la Russie (le gouvernement russe affirme avoir interrompu ses programmes d'armement biologique, mais les officiels américains en doutent).

Une réalité lugubre

Les cinq premiers de cette liste – l'Iran, l'Irak, la Libye, la Syrie et la Corée du Nord – sont particulièrement inquiétants, en raison de leur comportement. Après la guerre du Golfe, par exemple, l'Irak a reconnu avoir possédé des missiles Scud équipés d'ogives biologiques dès 1991. L'instabilité latente en Europe de l'Est, au Moyen Orient et en Asie du Sud-Ouest risque d'encourager un nombre croissant de pays à fabriquer des armes biologiques et chimiques.

L'élimination des armes biologiques et chimiques devrait être un objectif de l'ensemble des nations : on doit éviter

à tout prix un fléau d'origine humaine, dû au virus *Ebola*, par exemple.

Ce désarmement biologique est d'autant plus impératif que, dans de nombreux cas, toute la population ne pourrait être protégée contre une attaque biologique. Les vaccins préviennent certaines maladies, mais on ne peut vacciner toute la population contre toutes les maladies possibles. Les antibiotiques ne sont pas efficaces contre toutes les bactéries et de plus en plus de souches bactériennes résistent aux traitements. En outre, avec les méthodes du génie génétique, on pourrait concevoir de nouveaux organismes contre lesquels vaccins et antibiotiques seraient sans effet.

Les combinaisons de protection ne sont guère confortables, mais, heureusement, la plupart des agents biologiques n'agissent pas à travers la peau intacte : des masques à gaz et des vêtements usuels devraient suffire à protéger la plupart des personnes exposées contre de nombreux agents pathogènes, qui seraient alors détruits assez vite par le soleil et par la chaleur. Certains, toutefois, peuvent subsister indéfiniment dans l'environnement : l'île Gruinard, au large de l'Écosse, resta infectée par des bacilles charbonneux pendant 40 ans après les essais d'armes biologiques qui y furent réalisés dans les années 1940 ; selon Rex Watson, qui dirigeait le Département britannique de la défense chimique et biologique, si Berlin avait été bombardée avec des bacilles charbonneux pendant la Seconde Guerre mondiale, la ville serait encore contaminée.

Même si de nombreux Israéliens se sont habitués à porter un masque à gaz pendant la guerre du Golfe, on imagine difficilement d'imposer, pendant des mois ou des années, de tels équipements aux populations civiles vivant dans les régions exposées. Par temps très chaud, même les militaires ne supportent pas leur masque plus d'un quart d'heure.



2. DES VICTIMES DU VIRUS EBOLA ont été enterrées dans des fosses communes, à Kikwit, au Zaïre, en 1995. La secte japonaise Aum a pensé utiliser ce virus comme une arme biologique potentielle.

Pour toutes ces raisons, les demandes de programmes efficaces de défense contre la guerre biologique se sont multipliées, notamment après la guerre du Golfe. Les partisans d'un renforcement de la recherche dans ce domaine proposent souvent de protéger civils et militaires par des vaccins et par des équipements spéciaux, mais une difficulté incontournable demeure : à moins de connaître à l'avance l'agent pathogène employé comme arme et à moins d'avoir affaire à un micro-organisme sensible aux médicaments disponibles, toute défense est illusoire.

L'exemple de la guerre du Golfe fait imaginer des défenses inappropriées. On suppose que les armes biologiques de l'Irak étaient des bacilles charbonneux et la toxine botulique (bien que les toxines soient des produits de micro-organismes, elles sont considérées comme des agents biologiques, d'après le traité de 1972 sur les armes biologiques). Ces deux agents sont sensibles à des vaccins et aux traitements disponibles, et l'on aurait sans doute pu protéger les soldats. Des recherches visant à améliorer la défense contre ces agents sont en cours.

Que se passerait-il toutefois si les belligérants utilisaient des agents moins connus ? Il semble illusoire de croire que la recherche puisse procurer prochainement des moyens de défense contre des micro-organismes encore inconnus. De surcroît, un système de défense civil contre les armes biologiques et chimiques serait très onéreux : en 1969, un rapport des Nations unies indiquait que le stockage des masques à gaz, des antibiotiques et des vaccins destinés à la population civile dépasserait 20 milliards de dollars (100 milliards de francs). Aujourd'hui, on estime cette dépense à quelques 80 milliards de dollars (400 milliards de francs).

La mise au point des vaccins et des équipements de protection ne sont pas les seules difficultés posées par une guerre biologique ; le micro-organisme utilisé serait difficile à identifier rapidement au milieu d'un champ de bataille. Comment même savoir qu'une attaque biologique a été déclenchée ? Les recherches sur la détection des micro-organismes pathogènes, potentiellement utilisés lors d'une guerre biologique, ont été renforcées.

En mai 1994, le secrétaire américain à la Défense John Deutch a publié un rapport sur les mesures visant à limiter la prolifération des armes de des-

Les agents biologiques potentiels

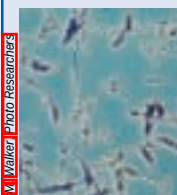


Photo: J. K. Kaper, Photo Research

Le bacille du charbon. Il est responsable de la maladie du charbon. Les symptômes apparaissent deux à trois jours après son inhalation. Les premiers symptômes sont ceux des infections respiratoires ; puis le malade a une forte fièvre, il vomit, il a des douleurs articulaires, des difficultés à respirer, des hémorragies. L'exposition au bacille peut être fatale. Les vaccins et les antibiotiques ont une action protectrice, sauf quand la quantité de bacilles inhalée est excessive.



Photo: J. K. Kaper, Photo Research

La toxine botulique. Produite par les bactéries *Clostridium botulinum*, elle est responsable du botulisme. Les symptômes apparaissent entre 12 et 72 heures après l'ingestion ou l'inhalation. Les premiers symptômes sont des nausées et des diarrhées, puis une grande faiblesse, des étourdissements et une paralysie respiratoire qui provoque souvent la mort. Une antitoxine est parfois salvatrice.



Photo: J. K. Kaper, Photo Research

Yersinia pestis. C'est l'agent causal de la peste bubonique, la peste noire du Moyen Âge. Quand les bactéries atteignent les poumons, les symptômes, dont la fièvre et le délire, apparaissent en trois ou quatre jours. Les cas non traités sont presque toujours mortels. Les vaccins préviennent la maladie, et les antibiotiques sont généralement efficaces, à condition d'être administrés rapidement.



Photo: J. K. Kaper, Photo Research

Le virus Ebola. Il est très contagieux et mortel. Il ne serait sans doute pas un agent pathogène utilisable, car on ignore s'il est stable dans l'environnement, hors de l'hôte. Les symptômes apparaissent deux ou trois jours après l'exposition : de fortes fièvres, des délires, des douleurs articulaires intenses, des saignements, des convulsions et, finalement, la mort. On ne dispose d'aucun traitement.

truction de masse. Il préconisait d'intensifier les recherches sur les nouvelles méthodes de spectroscopie qui améliorent la détection des agents pathogènes présents dans l'air. La mise au point d'un détecteur efficace d'agents pathogènes sera longue, mais les biologistes achèvent aujourd'hui la construction d'un système qui identifie divers agents en reconnaissant leurs antigènes à l'aide d'anticorps.

Dans ces dispositifs, des prélèvements d'air sont exposés à des anticorps répertoriés ; si l'air réagit, c'est qu'il contient le micro-organisme spécifique de l'anticorps. La réaction, qui s'effectue en une trentaine de minutes, permet d'identifier quatre agents : *Bacillus anthracis* (la bactérie de la maladie du charbon), *Yersinia pestis* (de la peste bubonique), la toxine botulique (le poison libéré par le bacille du botulisme) et l'entérotoxine B du staphylocoque (libérée par certaines souches de staphylocoques). On recherche des anticorps spécifiques d'autres agents biologiques, mais les organismes et les toxines qui pourraient être utilisés comme armes de guerre sont nombreux, et tous ne pourront peut-être pas être détectés par cette méthode.

Aussi la prévention restera-t-elle la mesure de protection la plus efficace contre la guerre et le terrorisme biologiques. La surveillance des maladies émergentes est ainsi devenue une préoccupation du gouvernement américain. On devrait établir des bases de données sur les maladies endémiques de par le monde, afin de détecter les épidémies insolites ; on pourrait alors prendre rapidement des mesures pour limiter la circulation des hommes et les échanges commerciaux. On identifierait ainsi plus efficacement les épidémies d'origine offensive.

De plus, on devrait vérifier que la Convention sur les armes biologiques de 1972 est correctement appliquée, notamment en inspectant les sites militaires. Les 139 pays signataires de la convention se sont réunis au mois de décembre 1996, afin d'élaborer de telles procédures d'inspection. À la suite de la conférence précédente, qui s'était tenue en 1991, un comité, nommé Verex, avait établi une liste de mesures envisageables, telles que la surveillance des journaux scientifiques ou l'inspection des sites potentiels de production d'agents contaminants.

Les moyens de défense contre les armes biologiques

Masque à gaz. Des filtres, généralement constitués de charbon actif, bloquent les particules supérieures à un micromètre. Des combinaisons sont également recommandées pour protéger les blessures ouvertes et les régions où la peau est lésée.

Les abris. Les meilleurs sont des chambres fermées, isolées par des films de plastique (ou par tout autre matériau imperméable) et ventilées avec de l'air filtré.

La décontamination. Des désinfectants classiques, tel le formaldéhyde (le formol), sont utilisés pour stériliser les surfaces.

Les vaccins. Les vaccins sont spécifiques des agents infectieux ; certains nécessitent plusieurs injections, étalées dans le temps, avant d'être efficaces. On ne dispose pas de vaccin contre tous les agents infectieux.

Les antibiotiques. Ils sont efficaces contre certaines bactéries, mais pas contre toutes, et ils sont inutiles contre les virus. Dans certains cas, le traitement antibiotique doit commencer dans les heures qui suivent l'exposition, avant que les symptômes n'apparaissent.

Les systèmes de détection. Seuls quelques dispositifs rudimentaires sont disponibles. Des recherches sont en cours pour augmenter le nombre d'agents susceptibles d'être détectés, sur des champs de bataille notamment.

(laboratoires, brasseries, laboratoires pharmaceutiques).

Les armes biologiques sont si faciles à produire que les accords internationaux pourront toujours être contournés, mais si les arsenaux ne détiennent pas de micro-organismes pathogènes et si l'acquisition et le transfert de ces agents sont rigoureusement contrôlés, leur obtention à des fins malveillantes sera plus difficile. Des vérifications, même minutieuses, n'apporteront pas une garantie totale, si bien que les adversaires de ces mesures soutiennent que ces efforts seront vains. Cependant, des sanctions appliquées en cas de violation des accords auraient un impact dissuasif, et un renforcement du traité affermirait l'engagement des nations à ne pas commercialiser de telles armes.

Le tabou du poison

Pourquoi les armes biologiques n'ont-elles pas été davantage utilisées jusqu'à présent ? Les utilisateurs potentiels ne savent sans doute pas bien comment se servir des micro-organismes pathogènes, et ils craignent sans doute de s'infecter eux-mêmes. En outre, les agents biologiques sont difficiles à contrôler, car des mutations risquent d'augmenter la virulence des bactéries ou des virus, ou bien, au contraire, de diminuer au cours du temps. Enfin,

une fois introduits dans l'environnement, les agents pathogènes menacent tout le monde, y compris les envahisseurs, qui ne peuvent plus occuper le territoire conquis de cette façon.

Au-delà de ces considérations pratiques, reste la répugnance à se servir de telles armes, qui tuent sans discrimination et en provoquant d'horribles douleurs. L'aversion naturelle pour les armes biologiques ne doit pas être sous-estimée ; elle retient peut-être certains terroristes, qui hésitent à utiliser des moyens qui feraient condamner leur action par le public.

La Convention contre les armes biologiques de 1972 stipule que « la conscience de l'humanité réprouverait l'emploi de telles méthodes ». Cette réprobation est ancrée dans l'inconscient collectif depuis des millénaires. Jusqu'à ce que l'on comprenne, au XIX^e siècle, que les micro-organismes sont la cause des infections, on ne différenciait pas les empoisonnements des maladies ; d'ailleurs, « virus » signifie « poison », en latin. Dans de nombreuses civilisations, on s'interdisait d'empoisonner la nourriture et l'eau des puits, et d'utiliser des poisons comme armes. Les Grecs et les Romains condamnaient l'utilisation guerrière du poison, qui représentait une violation du *Jus gentium*, la loi des nations. Les poisons et les armes considérées comme inhumaines ont été

interdites par la loi Manu, en Inde, vers -500, et chez les Sarrasins, 1 000 ans plus tard. Ces interdictions, reprises par le Hollandais Hugo Grotius dans son traité de 1625, *Du droit de la guerre et de la paix*, furent généralement respectées pendant les guerres de religions qui ont sévi en Europe à la fin du XVI^e et au XVII^e siècle.

Comme les tabous concernant l'inceste, le cannibalisme ou autres actes réprouvés dans de nombreuses sociétés, celui des armes empoisonnées a parfois été violé. Ces violations ont sans doute été limitées, car elles étaient sévèrement condamnées : selon le droit des nations, « Rien n'est plus expressément interdit que l'utilisation d'armes *empoisonnées* » (en italiques dans le texte).

Selon l'historien John Ellis van Courtland Moon, la montée des nationalismes au XVIII^e siècle a affaibli l'opprobre jeté sur les armes empoisonnées. À la suite de ce qu'il nomme la « nationalisation de l'éthique », les impératifs militaires ont commencé à supplanter les considérations morales, et les États ont cherché tous les moyens possibles pour atteindre leurs objectifs en cas de conflit.

Au milieu du XIX^e siècle, quelques militaires ont envisagé d'utiliser des armes toxiques, mais nul ne l'a fait. Néanmoins, des gaz toxiques ont été employés durant la Première Guerre mondiale. L'horreur fut si grande que le Protocole de Genève de 1925 a interdit tout usage d'agents chimiques et biologiques en cas de guerre. Les photographies des victimes qui agonisaient, écumant et suffoquant, eurent un impact profond sur la société. Le texte du protocole reflète cette horreur et stipule que ces armes ont été « condamnées à juste titre par l'opinion générale du monde civilisé ».

Les armes chimiques et biologiques n'ont quasiment pas été utilisées au cours des centaines de guerres et de conflits qui ont eu lieu au cours des décennies qui suivirent, jusqu'à l'attaque chimique déclenchée par l'Irak au cours de la guerre contre l'Iran. Les protestations internationales contre le comportement irakien ont malheureusement été timides et inefficaces. Entre 1983 et la fin de la guerre, en 1988, l'Irak n'a pas été mis en accusation pour ces meurtres chimiques. La crainte d'une victoire iranienne a étouffé les protestations sérieuses contre l'utilisation d'un armement qui avait été condamné unanimement.

Ce silence a eu des conséquences déplorables : l'apparente efficacité des armes chimiques, combinée à l'impunité dont a bénéficié l'Irak a encouragé d'autres pays à s'équiper d'armes chimiques et biologiques. Ironie du sort, plusieurs des pays qui s'étaient tus lorsque l'Irak avait utilisé des armes chimiques contre l'Iran ont été à leur tour menacés par les armes chimiques et biologiques irakiennes, pendant la guerre du Golfe, en 1991.

Depuis, la communauté internationale a fait pression sur l'Irak, et le Conseil de sécurité des Nations unies a pris des sanctions pour que le stock irakien d'armes biologiques et des autres armes de destruction de masse soit anéanti. L'Irak ne s'étant pas plié à ces exigences, les inspecteurs des Nations unies poursuivent leurs efforts pour obtenir des informations plus complètes sur les armements secrets irakiens.

Toutefois, les rapports des Nations unies sont factuels, sans expressions d'indignation. Or, tous les pays et tous les groupes qui mettent au point ce type d'armement méritent d'être condamnés. Nous devons sans cesse rappeler que les peuples civilisés ne doivent faire ni commerce ni usage de telles armes, et que les États-Unis et la Russie doivent détruire leurs stocks d'armes chimiques en une dizaine d'années, comme ils en sont convenus.

Comme l'indignation ne suffit pas, un contrôle strict des échanges nationaux et internationaux d'agents pathogènes, et une surveillance accrue des épidémies mondiales seront indispensables.

En attendant, on doit absolument commencer par faire respecter la Convention sur les armes chimiques, qui interdit la possession d'armes chimiques et qui dresse la liste des produits chimiques devant faire l'objet d'une déclaration par les nations signataires. Contrairement à la Convention sur les armes biologiques, de nombreuses procédures de vérification sont prévues par la Convention sur les armes chimiques, y compris des inspections impromptues quand on soupçonne qu'il y a violation des engagements. Des garanties commerciales sont accordées aux pays signataires, pour les inciter à adhérer à la convention.

La Convention sur les armes chimiques a été proposée en 1993 et, en octobre 1996, elle avait été signée par

157 pays et ratifiée par 66 : il manquait une signature pour qu'il puisse entrer en application. Le Sénat des États-Unis a bloqué la ratification, notamment parce qu'il n'acceptait pas les clauses de vérification.

Si l'on réussissait à faire appliquer le traité sur les armes chimiques, les négociations en cours sur le renforcement de la Convention sur les armes biologiques seraient probablement facilitées. Inversement, si la Convention sur les armes chimiques échoue, les perspectives d'un accord sur les protocoles de vérification de l'application du traité biologique s'amenuiseront : les arsenaux chimiques et biologiques continueront à proliférer. Or, plus ces armes persisteront, plus le sentiment de leur illégitimité s'érodera, et plus la probabilité de leur utilisation par les armées ou par les terroristes augmentera.

Comme l'ont remarqué certains experts, les terroristes utilisent généralement les armes présentes dans les arsenaux de leur pays ; notamment, les responsables de la secte Aum auraient découvert l'intérêt des armes chimiques pendant la guerre entre l'Irak et l'Iran. Si les armes biologiques et chimiques disparaissent des arsenaux, elles devraient cesser d'attirer les terroristes.

Les traités, la vérification de leur application, la surveillance du commerce des agents pathogènes doivent tous améliorer le contrôle de l'armement chimique et biologique. En insistant sur le sens moral qui rejetait jadis les armes biologiques, on augmentera les chances qu'elles soient éliminées à tout jamais.

Leonard COLE est professeur de sciences politiques à l'Université Rutgers de Newark.

Leonard A. COLE, *Clouds of Secrecy : The Army's Germ Warfare Tests over Populated Areas*, Rowman and Littlefield, 1990.

Biological Weapons : Weapons of the Future?, sous la direction de Brad Roberts, Center for Strategic and International Studies, 1993.

Malcolm DANDO, *Biological Warfare in the 21st Century*, Macmillan, 1994.

Leonard A. COLE, *The Eleventh Plague : The Politics of Biological and Chemical Warfare*, W.H. Freeman and Company, 1996.

Les nanomatériaux

RICHARD SIEGEL

Des solides composés de grains très fins sont plus durs, plus malléables ou plus transparents que les matériaux habituels.

Un soir de septembre 1989, nous avons décidé de nommer «matériaux nanophases» la nouvelle catégorie de matériaux que nous fabriquions. Les métaux nanophases, les céramiques nanophases et autres solides nanophases, autrement nommés nanomatériaux, sont constitués des mêmes éléments chimiques que leurs homologues classiques, mais, tandis que ces derniers sont des assemblages de grains dont le diamètre varie du micromètre au millimètre, composés de plusieurs milliards d'atomes, les grains constitutifs des matériaux nanophases mesurent moins de 100 nanomètres et contiennent au plus quelques dizaines de milliers d'atomes. Un agrégat de trois nanomètres de diamètre, par exemple, contient 900 atomes et est un million de fois plus petit que le point final de cette phrase.

Les nanomatériaux ont des propriétés originales, parce que leurs petits grains réagissent très différemment des grains plus gros aux contraintes mécaniques ou aux champs électromagnétiques. Par exemple, le cuivre nanophase est cinq fois plus dur que le cuivre ordinaire, et les céramiques nanophases sont moins cassantes que leurs cousines à gros grains. Nous ajustons la dureté, la couleur ou la plasticité de ces matériaux, en choisissant la taille des grains qui les constituent.

On trouve aujourd'hui des nanomatériaux dans de nombreux produits de consommation courante, des cosmétiques à l'électronique, et la liste de leurs applications n'est pas close. La croissance de l'entreprise que nous avons fondée pour les commercialiser témoigne de ce développement : nous produisons aujourd'hui par tonnes des matériaux qui n'étaient fabriqués, il y a quelques années encore, que par milligrammes, seulement pour les laboratoires de recherche.

Les nanomatériaux sont présents depuis longtemps dans la nature, des roches des météorites aux valves des coquillages. Dès que les hommes firent du feu, ils fabriquèrent aussi des particules nanométriques de fumée. Toutefois, l'histoire scientifique des nanomatériaux n'a commencé qu'en 1959, lorsque Richard Feynman évoqua en public les potentialités des toutes petites particules de matière condensée : «Je suis certain que si nous maîtrisons la structure de la matière à petite échelle, nous accéderons à un beaucoup plus grand nombre de propriétés de la matière.»

Des confirmations théoriques de cette intuition apparurent bientôt : au début des années 1960, Ryogo Kubo, de l'Université de Tokyo, détermina le comportement quantique de petits agrégats d'atomes. Ce modèle ne décrivait pas les conséquences du confinement des atomes sur les propriétés des

matériaux, mais il les faisait pressentir : lorsque la taille des grains élémentaires d'un matériau devient inférieure à la longueur critique associée à une propriété donnée, cette propriété devient ajustable.

Des métaux à grains fins

La recherche sur les agrégats nanométriques s'est développée au cours des 20 années suivantes, surtout au Japon et en URSS. Toutefois ces recherches étaient confidentielles, et c'est seulement en 1981, lors d'un colloque au Danemark, que Herbert Gleiter, de l'Université de la Sarre, annonça que les matériaux fabriqués par compactage de particules ultrafines avaient des propriétés radicalement différentes de celles des matériaux ordinaires. Peu après, son équipe publia plusieurs articles novateurs sur les métaux nanocristallins.



1. DES SUSPENSIONS DE PARTICULES NANOMETRIQUES du même matériau ont des couleurs différentes selon la taille de ces particules. Chacun des flacons présentés sur les photographies contient du sélénure de cadmium : seule la taille des grains varie. Chacun a une couleur différente, en lumière blanche (à droite) et en lumière ultraviolette (ci-dessus).

Quatre ans plus tard, avec Horst Hann, ancien élève de H. Gleiter, nous avons essayé de fabriquer des matériaux non métalliques avec des grains nanométriques. En quelques mois, nous avons obtenu une céramique composée d'agrégats d'oxyde de titane de dix nanomètres de diamètre (l'oxyde de titane est un pigment blanc, très utilisé dans diverses industries, de la peinture à la pâte à papier).

Notre technique ressemblait à celle des chimistes russes ou japonais. Lorsque l'on fait bouillir de l'eau près d'une fenêtre et qu'il gèle dehors, les molécules d'eau qui s'évaporent rencontrent l'air froid de la pièce et se condensent en fines gouttelettes d'eau suspendues dans l'air. La convection

naturelle conduit l'air et les gouttelettes vers la vitre froide, où l'eau liquide se condense en cristaux de glace. De la même façon, lorsqu'un métal est chauffé à une température supérieure à sa température de fusion, des atomes s'en évaporent. Pour fabriquer un nanomatériau, on refroidit ces atomes avec un gaz inerte, tel l'hélium, qui ne réagit pas chimiquement avec eux : les atomes d'hélium absorbent l'énergie des atomes métalliques, qui se condensent en petits agrégats solides. Le diamètre de ces agrégats quasi sphériques est ajustable entre 1 et 100 nanomètres par le réglage de la vitesse d'évaporation des atomes métalliques, et de la nature et de la pression du gaz inerte.

Pour obtenir un métal nanophase, on fait évaporer ce métal, et l'on agglomère les agrégats formés avant qu'ils ne puissent réagir avec des molécules de leur environnement. Pour obtenir une céramique, au contraire, les agrégats métalliques doivent réagir avec un gaz (l'oxygène pour l'oxyde de titane) avant d'être agglomérés. La simplicité de cette méthode nous laissait penser que nous pourrions fabriquer la forme nanophase de la plupart des matériaux, métaux, céramiques, semi-conducteurs, polymères, et composites de ceux-ci. Nous nous sommes toutefois concentrés sur les céramiques et les métaux, afin de bien comprendre le comportement de ces matériaux.



Ayant d'abord fabriqué de la poudre ultrafine d'oxyde de titane, nous avons cherché à l'agglomérer en un bloc de taille macroscopique. Qu'obtiendrait-on par un frittage, où l'on comprime la poudre tout en la chauffant suffisamment pour que les grains se lient les uns aux autres en échangeant des atomes? Les chimistes pensaient que le frittage d'une poudre nanométrique interviendrait à une température inférieure à celles qui sont habituellement nécessaires et produirait un solide plus compact (de petits grains sont plus faciles à empiler de façon compacte). Toutefois, avant la mise au point de notre méthode de synthèse, les poudres céramiques fines étaient obtenues par des techniques de précipitation à partir de solutions ; ces agglomérats étaient difficiles à compacter, et les solides frittés que l'on fabriquait étaient souvent poreux.

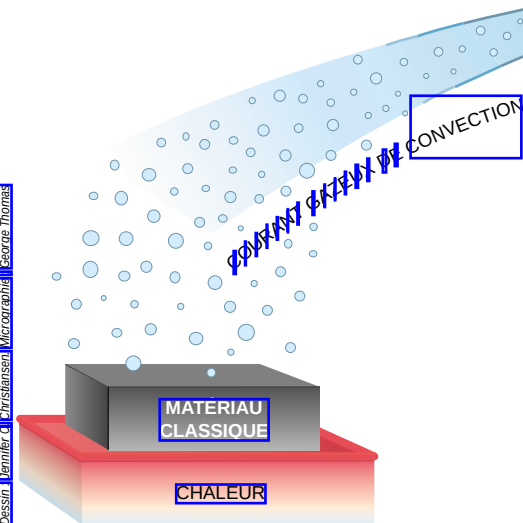
Une céramique plus dure

Nos poudres nanométriques de titane étaient également agglomérées, mais ces agglomérats étaient si fragiles que

les grains se soudaient ou se dissociaient aussitôt. En outre, notre poudre ultrafine avait d'excellentes propriétés mécaniques et rhéologiques. Elle pouvait être frittée à des températures inférieures d'environ 600 °C à celles requises pour l'oxyde de titane classique (1 400 °C). Le solide obtenu était aussi plus dur et moins cassant.

L'oxyde de titane nanophase est même malléable : à température ambiante, il prend la forme du moule où on le presse. De surcroît, de nombreuses autres céramiques nanophases ont la même propriété. En 1988, nous avons analysé plus finement ces propriétés. À température ambiante, l'oxyde de titane nanophase devient beaucoup plus malléable lorsque la taille de ses grains est inférieure à 30 nanomètres. Cette découverte ouvrait la voie vers la mise en forme directe par emboutissage : on pourrait fabriquer rapidement et à faible coût des pièces en céramique, pour l'industrie automobile, par exemple. En outre, ces pièces résisteraient mieux aux hautes températures ou à l'atmosphère corrosive qui règnent dans un moteur.

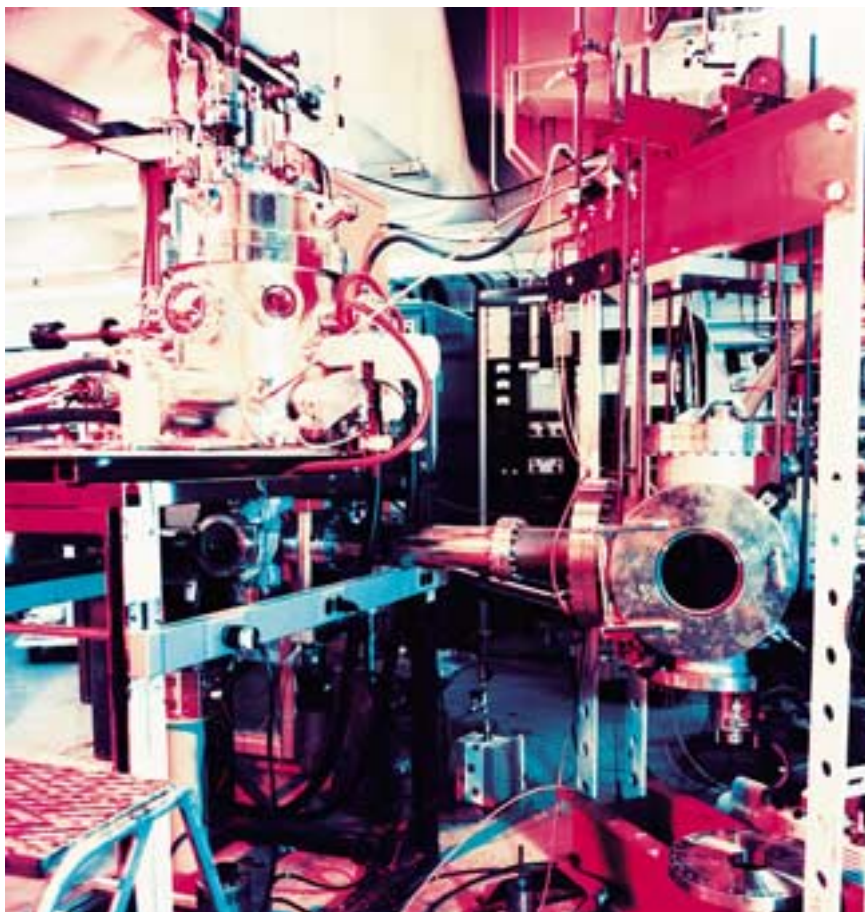
3. QUAND ON CHAUFFE un bloc métallique au-dessus de son point de fusion, des atomes s'évaporent. Ils se condensent en agrégats qui sont conduits, par convection, jusque dans un tube collecteur, où ils sont refroidis. Ces agrégats sont ensuite retirés du tube, puis compactés dans une presse.



Dessin : Lemière, Hirsenssen, Micrographie : Serge Thomas

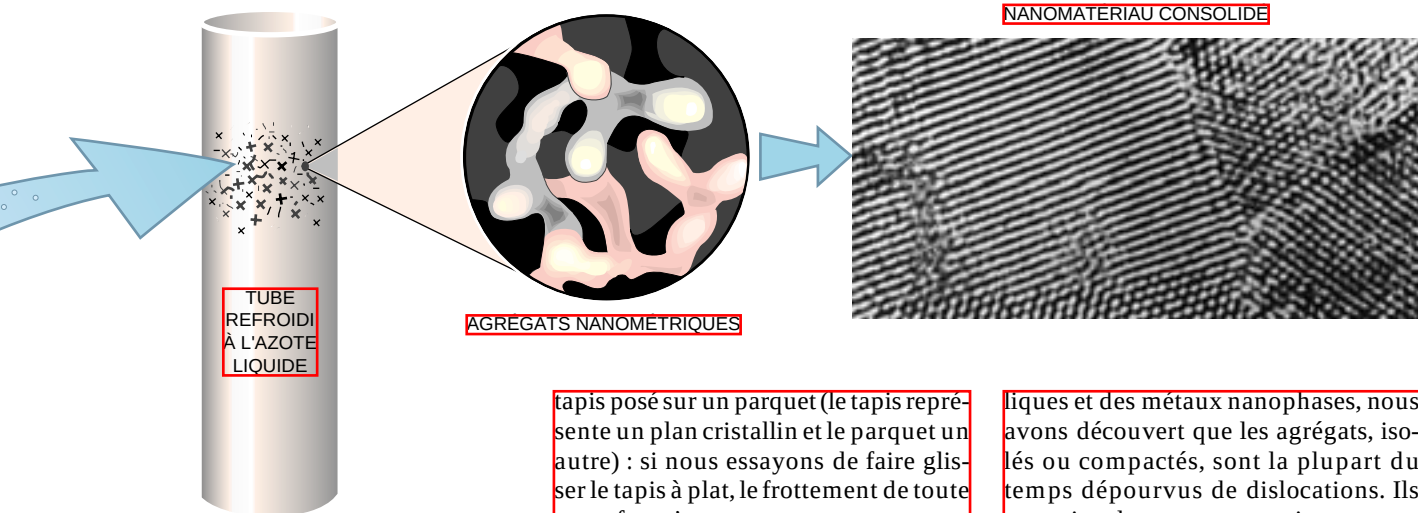
Une autre équipe a déformé de l'oxyde de titane nanophase très dense en le comprimant à des températures aussi élevées que 800 °C ; la déformation peut atteindre 60 pour cent sans rupture, alors que les céramiques ordinaires cassent toujours dans de telles conditions. Récemment, une équipe a démontré la faisabilité de l'emboutissage de l'oxyde de titane nanophase, rapprochant ce procédé de l'industrialisation.

Comment des matériaux si fragiles que des céramiques se déforment-ils ainsi sans casser, quand ils sont de type nanophase? Lorsque l'on marche sur un tas de sable, les grains glissent les uns sur les autres. Dans le cas d'un solide massif, en revanche, les grains sont liés, de sorte que si l'on comprime un point, beaucoup de liaisons intergranulaires se rompent simultanément et une cassure apparaît. Lorsqu'une fracture commence à se former, des atomes voisins se déplacent pour la combler : plus les grains sont petits, plus la distance que ces atomes doivent parcourir est courte, et donc plus la réparation est rapide. Des grains nanométriques glissent donc plus facilement les uns sur les autres que des grains millimétriques. Les céramiques ordinaires que sont les minéraux se déforment ainsi, mais en plusieurs millions d'années. Les céramiques nanophases, qui ressemblent plus à un tas de sable, supportent une déformation rapide, compatible avec les procédés industriels.



S. Thomas

2. ON FABRIQUE LES NANOMATERIAUX à l'aide d'une chambre de synthèse (en haut, à gauche) et d'une presse (en bas, à droite).



La dureté des métaux varie en sens inverse de celle des céramiques : plus les grains des métaux classiques sont petits, plus le matériau est dur. Les métaux nanophases seraient-ils durs à l'extrême ? Nous avons fabriqué du palladium et du cuivre nanophases ; puis nous avons mesuré leur dureté en fonction de la taille de leurs grains. La dureté du cuivre augmente à mesure que la taille moyenne de ses grains diminue : quand les grains ont 50 nanomètres de diamètre, le cuivre nanophase est deux fois plus dur que le cuivre classique ; avec des grains de 6 nanomètres (la plus petite taille que nous obtenons), il est cinq fois plus dur. Ces résultats ont été confirmés par différentes méthodes, pour plusieurs métaux nanophases.

Pourquoi cette dureté exceptionnelle ? Un métal est déformé lorsque ses plans atomiques cristallins glissent les uns sur les autres. Imaginons un

tapis posé sur un parquet (le tapis représente un plan cristallin et le parquet un autre) : si nous essayons de faire glisser le tapis à plat, le frottement de toute sa surface s'oppose au mouvement ; en revanche, si nous plissons le tapis sur toute sa largeur à l'une de ses extrémités et que nous propageons ce pli de l'autre côté, le tapis se déplace facilement. Le pli est analogue à un défaut dans un plan atomique nommé dislocation : les métaux se déforment par la propagation de dislocations. Pour renforcer la dureté des métaux ordinaires, on peut disposer des obstacles sur le chemin des dislocations, telles des interfaces entre des grains différemment orientés, des joints de grains. C'est pourquoi la réduction de la taille des grains, qui augmente la densité des joints de grains, accroît la dureté.

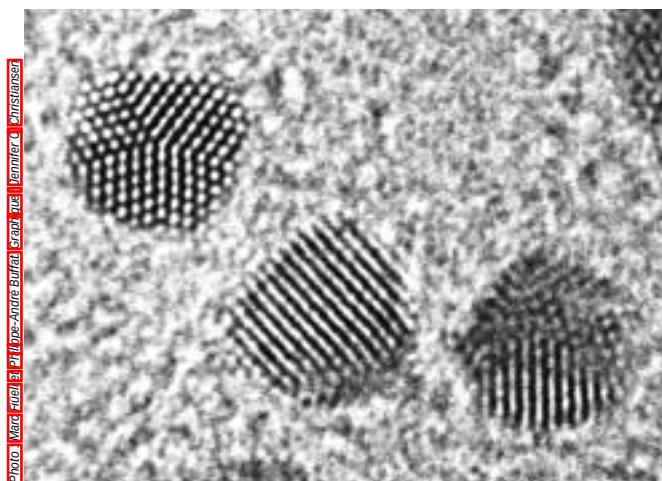
Les métaux nanophases sont-ils particulièrement durs parce qu'ils contiennent un grand nombre de joints de grains capables d'empêcher la propagation de dislocations ? Les analyses ont montré que la cause de leur dureté est ailleurs : en observant en microscopie électronique à transmission des agrégats métal-

liques et des métaux nanophases, nous avons découvert que les agrégats, isolés ou compactés, sont la plupart du temps dépourvus de dislocations. Ils sont simplement trop petits pour en contenir, et celles-ci sont difficiles à créer.

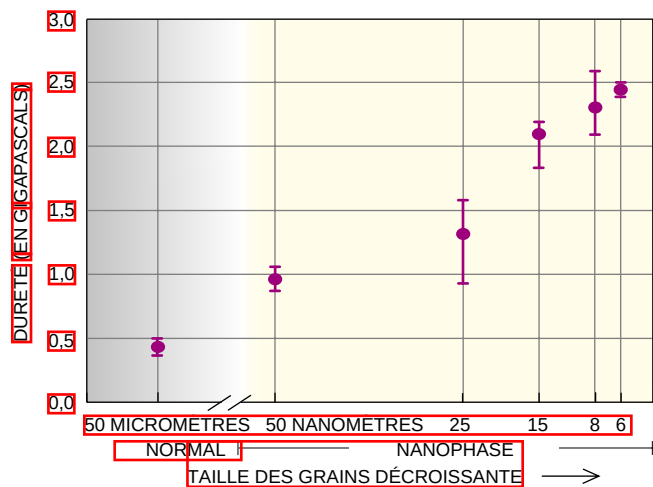
Plus de transparence

Les caractéristiques optiques des nanomatériaux dépendent également de la taille et de la disposition des agrégats. Par exemple, des particules de 1 à 50 nanomètres de diamètre sont trop petites pour disperser la lumière visible, dont la longueur d'onde est comprise entre 380 et 765 nanomètres : elles perturbent aussi peu la propagation des rayonnements lumineux qu'un canot de sauvetage brise les lames de l'océan. Autrement dit, les solides nanophases sont transparents s'ils ne contiennent pas de pores de taille supérieure à celle des agrégats. Une céramique transparente d'oxyde d'yttrium, qui est habituellement un matériau opaque, a ainsi été fabriquée.

Au contraire, les rayonnements de longueur d'onde inférieure, tels



4. DES AGREGATS D'OR d'environ trois nanomètres de diamètre, observés ici en microscopie électronique à transmission sur un film de carbone amorphe, ne contiennent que quelques plans atomiques (traits blancs et noirs).

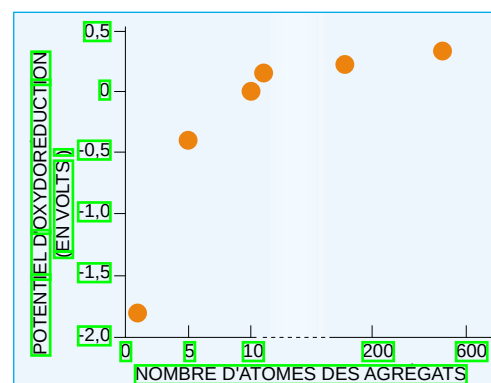


5. LA DURETE DU CUIVRE NANOPHASE augmente quand la taille de ses grains diminue. Les grains nanométriques ne contiennent pas beaucoup de dislocations, défauts qui facilitent la déformation du métal massif.

Réactivité et taille des agrégats

En 1973, une équipe du Laboratoire de physico-chimie des rayonnements, à Orsay, observait, pour la première fois, que les propriétés d'agrégats de quelques atomes métalliques sont différentes de celles du métal massif. Dans les agrégats, la force des liaisons chimiques entre les atomes dépend beaucoup de leur nombre, surtout quand celui-ci est faible. Ce nombre d'atomes gouverne toutes les propriétés physiques et chimiques des agrégats.

Depuis cette date, nous



Plus un agrégat métallique est petit, plus son potentiel d'oxydoréduction est faible : les plus petits agrégats s'oxydent beaucoup plus facilement que le métal massif. Le potentiel est ici rapporté à l'électrode normale à hydrogène

synthétisons des petits agrégats en solution, en transformant des ions métalliques en atomes neutres à l'aide de rayonnements ionisants (gamma, X ou faisceau de particules). Les atomes, formés isolément, s'agrègent progressivement. La taille finale des agrégats varie de quelques atomes à quelques centaines d'atomes. Elle est ajustée par le réglage de la dose de rayonnement et par l'ajout de molécules tensioactives qui forment une enveloppe autour de chaque agrégat et le stabilisent. Pour des conditions données, tous les agrégats croissent à la même vitesse et atteignent donc des tailles très proches. On observe directement, comme dans un film au ralenti, les différentes étapes, de la formation des atomes isolés à la coalescence des agrégats, en associant l'irradiation par des impulsions brèves (fournies par un faisceau de particules) à une détection spectroscopique en fonction du temps.

Les agrégats formés en solution par synthèse radiolytique peuvent être déposés à la surface de divers matériaux (oxydes, électrodes métalliques ou semi-conductrices, fibres de carbone), ou insérés dans les pores d'un matériau (membrane polymère, zéolithe). Des agrégats bimétalliques sont produits avec la même méthode, à partir d'une solution qui contient des ions de deux métaux : selon les conditions d'irradiation, on conduit la synthèse soit vers des structures où le cœur est formé du métal le plus noble et l'enveloppe du moins noble, soit vers un véritable alliage, comme dans une solution solide, avec parfois même des arrangements ordonnés des deux types d'atomes.

Plusieurs sociétés industrielles se sont intéressées à ces agrégats synthétisés par voie radiolytique, afin d'en exploiter les propriétés. Diverses applications sont utilisées ou en cours de développement : en catalyse, en électronique, en optique non linéaire et dans les processus photographiques.

La principale propriété thermodynamique d'un agrégat est sa capacité à perdre ou à gagner un électron en réagissant avec un autre système chimique, capacité caractérisée par une grandeur mesurable nommée potentiel d'oxydoréduction. La variation de ce potentiel d'oxydoréduction en fonction du nombre d'atomes des agrégats a été établie (voir la figure) : on introduit en solution une molécule référence, qui peut échanger des électrons avec les agrégats, et dont on connaît le potentiel d'oxydoréduction. Les agrégats les plus petits perdent des électrons et se dissolvent : leur potentiel est inférieur à celui de la référence. En revanche, les agrégats de potentiel supérieur à celui de la référence gagnent des électrons et, par la réduction successive d'ions métalliques à leur surface, leur taille augmente. Grâce à ces études, le mécanisme du développement photographique, employé empiriquement depuis plus d'un siècle, est enfin complètement expliqué. Ces travaux permettront d'améliorer la qualité des émulsions photographiques.

Jacqueline BELLONI, URA 75 du CNRS et Université Paris Sud

les ultraviolets, sont dispersés ou absorbés par les céramiques nanométriques d'oxyde de titane, d'oxyde de zinc ou d'oxyde de fer. On teste aujourd'hui ces poudres pour fabriquer des écrans solaires.

En outre, des phénomènes quantiques de confinement font varier la couleur apparente de certains agrégats nanométriques avec leur taille. Des solutions d'agrégats d'un même matériau, par exemple le sélénure de cadmium, mais de tailles différentes ont des couleurs différentes. Cette propriété serait utilisable dans l'industrie des cosmétiques.

Les chimistes étudient aussi l'utilisation des matériaux nanophases comme catalyseurs. Depuis longtemps, ils emploient des particules nanométriques de platine et de rhodium, déposées sur des matériaux supports. Donald Beck, de la Société *General Motors*, avait montré que l'oxyde de titane élimine le sulfure d'un flux gazeux contenant du sulfure d'hydrogène (semblable à certains effluents de raffineries, par exemple). Aussi pensions-nous que de l'oxyde de titane nanophase faiblement compacté, de grande porosité, serait, grâce au grand rapport surface sur volume de ses petits agrégats, un bon catalyseur d'oxydation du sulfure en soufre. Le succès dépassa nos espérances : la quantité totale de sulfure éliminée d'un échappement simulé, sur une durée de sept heures à 500 °C, était environ cinq fois supérieure à celle qui était éliminée par toutes les autres formes d'oxyde de titane que nous avons testées. En outre, après sept heures d'exposition, la proportion de sulfure oxydé restait élevée, alors que tous les autres échantillons étaient devenus inefficaces.

Une éponge à sulfure

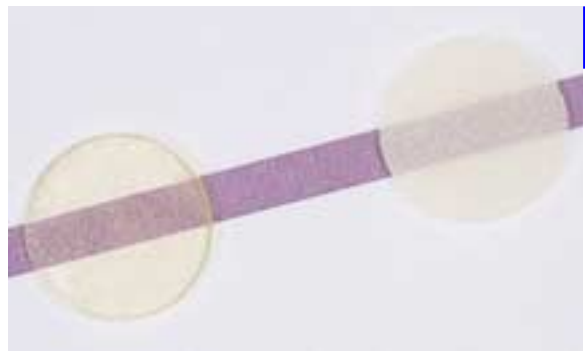
Le grand rapport entre la surface exposée et le volume de l'oxyde de titane nanophase n'était pas la seule raison de ces performances : des manques d'atomes d'oxygène, à l'intérieur des grains (lacunes mises en évidence par spectroscopie Raman), permettent la diffusion rapide des atomes de soufre venant de la surface. Ainsi libérés, les sites de fixation du sulfure, à la surface des grains, peuvent accueillir d'autres atomes de soufre : la longévité du catalyseur est renforcée.

Les nanomatériaux ont enfin des propriétés électromagnétiques intéressantes.

De la poudre magnétique ultrafine sert déjà dans des dispositifs d'enregistrement. Les ingénieurs ont observé avec intérêt que l'application d'un champ magnétique réduit considérablement la résistivité électrique de certaines nanostructures : cette magnétorésistance géante devrait être utilisée pour le stockage des données.

Une autre application industrielle des propriétés électromagnétiques des nanomatériaux utilisera probablement de l'oxyde de zinc. Ce dernier entre aujourd'hui dans la composition d'un composant électronique courant, le varistor, dont la résistance électrique diminue lorsque le courant qui le traverse augmente sur un large intervalle, la tension aux bornes restant égale à une tension dite de seuil. Les varistors actuels sont fabriqués avec une céramique semiconductrice : l'oxyde de zinc, polycristallin et dopé par diverses impuretés sélectionnées. Comme leur comportement non linéaire provient des propriétés électriques des joints de grains, j'avais supposé que l'oxyde de zinc nanophase, qui possède un nombre de joints de grains bien supérieur à celui du matériau ordinaire, serait encore mieux adapté à la fabrication des varistors.

Nous avons réussi à produire de l'oxyde de zinc nanophase pur, et nous venons de montrer qu'il se comporte en varistor. Sa tension de seuil est petite (environ 40 fois inférieure à celle de l'oxyde ordinaire, fortement dopé), mais utilisable pour les mêmes appli-



6. LES CÉRAMIQUES TRANSPARENTES, tel l'oxyde d'yttrium (à gauche), contiennent des pores et des agrégats de diamètre inférieur à 50 nanomètres. Les particules et les pores plus grands dispersent la lumière visible, et rendent opaque le même matériau (à droite).

cations. En outre, si l'on dope l'oxyde de zinc nanophase comme celui des varistors commerciaux, il est encore plus performant. Nous produirons bientôt des varistors à l'oxyde de zinc dont la tension de seuil variera sur plus d'un facteur 300. Les paramètres importants seront la taille des grains (le nombre de joints de grains chargés dans le matériau), et la quantité et le type du dopant placé dans les joints de grains.

Beaucoup d'équipes dans le monde mettent au point de nouvelles méthodes de synthèse des nanomatériaux : à partir de précurseurs atomiques ou moléculaires, par des méthodes chimiques ou physiques, et à partir du traitement d'un précurseur massif, par exemple en raffinant mécaniquement les grains ou en cristallisant des substances amorphes. Ces méthodes permettront de fabriquer une grande variété de nanomatériaux, et d'explorer ainsi l'éventail de leurs propriétés exceptionnelles. Une révolution est en marche : elle s'accélérera à mesure que nous maîtriserons la matière à l'échelle atomique.

Richard SIEGEL est professeur de sciences des matériaux à l'Institut polytechnique Rensselaer.

Pierre JOYES, *Les agrégats inorganiques élémentaires*, les Éditions de physique, Courtabœuf, 1990.

R. DAGANI, *Nanostructured Materials Made from Ultrasmall Building Blocks Promise to Advance a Range of Technologies*, in *Chemical & Engineering News*, vol. 70, n° 47, pp. 18-24, 23 novembre 1992.

R.W. SIEGEL, *Nanostructured Materials : Mind over Matter*, d'après *Proceedings of the First International Conference on Nanostructured Materials*, sous la direction de M. José Yacamán, T. Tsakalakos et B.H. Kear, in *Nanostructured*

Materials, vol. 3, nos 1-6, pp. 1-18, 1993.

R.W. SIEGEL, *Nanophase Materials*, in *Encyclopedia of Applied Physics*, vol. 11, sous la direction de George L. Trigg, VCH Publishers, 1994.

Nanophase Materials : Synthesis, Properties, Applications, sous la direction de G.C. Hadjipanayis et R.W. Siegel, Kluwer Academic Publishers, 1994.

H. GLEITER, *Nanostructured Materials : State of the Art and Perspectives*, d'après *Proceedings of the Second International Conference on Nanostructured Materials*, sous la direction de H.-E. Schaefer, R. Wüschum, H. Gleiter et T. Tsakalakos, in *Nanostructured Materials*, vol. 6, nos 1-4, pp. 3-14, 1995.

La résistance des bactéries aux antibiotiques

ANTOINE ANDREMONT • DENIS CORPET • PATRICE COURVALIN

Les antibiotiques sauvent des millions de vies. Toutefois, ils favorisent la sélection de bactéries résistant aux antibiotiques. Ces résistances, mal maîtrisées, menacent aujourd'hui la santé publique.

Baudelaire et Maupassant, morts de la syphilis, auraient été sauvés par la pénicilline, Chopin et Musset, morts de la tuberculose, par la streptomycine. Ils sont décédés bien avant que la pénicilline ne soit disponible. Elle a été découverte en 1928, mais presque 20 ans s'écouleront avant qu'elle ne soit fabriquée industriellement.

À son retour de vacances, le médecin bactériologiste anglais Alexander Fleming observe une culture de bactéries qui l'intrigue : au lieu d'avoir proliféré pendant son absence, les staphylocoques ont été en partie détruits. Il découvre que la culture a été accidentellement contaminée par la moisissure *Penicillium*, qui a tué les bactéries. Il prépare un filtrat de moisissure, qu'il nomme pénicilline : la solution a un fort pouvoir bactéricide et une faible toxicité.

Cette découverte a peu de retentissement, car on pense alors que toute substance toxique pour les microbes est aussi néfaste pour l'homme. En outre, Fleming ne réussit pas à isoler le produit actif, très instable. En 1940, Florey et Chain purifient une pénicilline concentrée et stable ; le premier patient atteint de septicémie (ou infection généralisée grave) à staphylocoque est traité en 1941. Peu après, la production industrielle est mise au point aux États-Unis. En raison de l'efficacité de la pénicilline, on croit posséder enfin un médicament contre la plupart des infections bactériennes : la méningite, la fièvre typhoïde, la syphilis ou autres fléaux semblent définitivement vaincus.

Pourtant, dès 1945, Fleming prévoit les risques potentiels liés à l'utilisation des antibiotiques. Il craint que leur utilisation à grande échelle ne sélectionne des bactéries résistantes : dans son laboratoire, il observe que des bactéries, sensibles à la pénicilline en début d'expérience, parviennent à se multiplier en présence de concentrations croissantes de l'antibiotique. Selon lui, les bactéries sensibles ont été détruites, et les bactéries résistantes se sont multipliées sans limitation.

Premières résistances

Dans un entretien qu'il accorde à un journaliste du *New York Times*, il met la communauté médicale et le public en garde : « Les plus grands maux viendraient de ce que l'automédication aboutisse à l'utilisation de doses trop faibles d'antibiotiques. Cela aboutirait à ce qu'au lieu d'éliminer l'infection, on apprenne aux microbes à résister à la pénicilline et à ce que ces microbes résistants soient transmis d'un individu à un autre jusqu'à ce qu'ils atteignent un chez qui ils provoquent une pneumonie ou une septicémie que la pénicilline ne pourra pas guérir. »

Fleming avait raison, et la capacité des bactéries à acquérir des mécanismes de résistance aux agents antimicrobiens est bien supérieure à celle qu'il avait imaginée.

Or, ces bactéries sont omniprésentes. Elles se sont adaptées à tous les milieux, liquides ou solides, vivants ou inanimés, et sont généralement inoffensives pour l'homme. Pourtant,

quelques unes sont pathogènes : adaptées aux conditions physiologiques de l'organisme, elles y prolifèrent, ce qui déclenche les symptômes des infections bactériennes, notamment l'augmentation de la température corporelle.

Malgré les avertissements lancés par certains microbiologistes pendant les années 1960 et 1970, les médecins ont cru que l'apparition de bactéries résistant aux antibiotiques n'était qu'un phénomène limité, qui serait compensé par la découverte de nouvelles molécules antibiotiques.

Les années 1990 sont celles du désenchantement : un certain nombre d'espèces bactériennes sont devenues résistantes aux antibiotiques, au point que les infections qu'elles causent ne sont plus curables par les antibiotiques disponibles. Ces bactéries résistantes sont des bactéries pathogènes, tels que les pneumocoques, responsables de maladies pulmonaires, mais aussi des bactéries dites opportunistes ; peu agressives chez les personnes bien portantes, les bactéries opportunistes déclenchent des infections chez les personnes dont les défenses immunitaires sont affaiblies, notamment chez les malades hospitalisés.

Ces infections acquises à l'hôpital, également nommées infections nosocomiales (du grec *nosos*, maladie et *komeo*, soigner), sont parfois redoutables. Elles représentent, en France comme dans les autres pays industrialisés, un risque important pour la santé publique : près de cinq pour cent des personnes hospitalisées sont atteintes par une infection nosocomiale.

Les infections nosocomiales

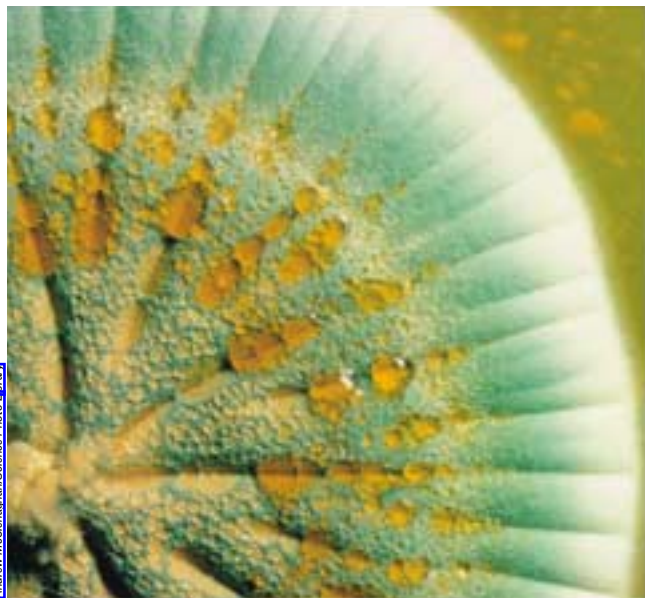
Si la plupart des infections nosocomiales sont traitées par les antibiotiques, un petit nombre sont dues à des bactéries qui résistent à plusieurs familles d'antibiotiques. Elles sont d'autant plus graves qu'elles atteignent des patients dont les défenses immunitaires sont amoindries par la maladie qui a nécessité l'hospitalisation, par certains traitements, telle la chimiothérapie, par la chirurgie ou par les interventions

nécessitées par une réanimation. On tente de sauver les malades en les traitant par les antibiotiques les plus récents, mais aussi les plus coûteux.

On évalue difficilement la mortalité associée aux infections nosocomiales, car les personnes qui en sont atteintes souffrent souvent de plusieurs maladies simultanées. Un patient décède-t-il de la maladie qui a justifié son hospitalisation ou de l'infection nosocomiale acquise en milieu hospitalier? Selon Grace Emori et

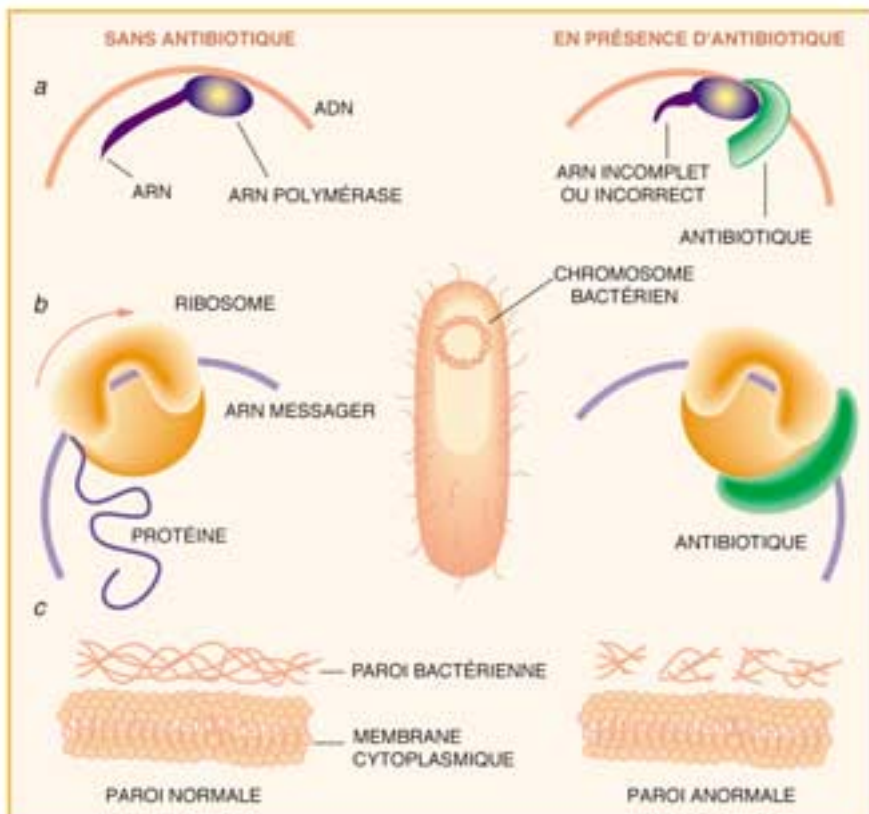
Robert Gaynes, du Centre de contrôle des maladies d'Atlanta, plusieurs milliers de personnes mourraient chaque année, aux États-Unis, des suites d'une infection nosocomiale. C'est vraisemblablement le cas aussi en Europe.

Devant certaines infections nosocomiales, on se retrouve dans des situations thérapeutiques aussi difficiles qu'avant l'ère des antibiotiques. Certaines bactéries isolées en milieu hospitalier résistent déjà à tous les antibiotiques : c'est le cas de cer-



1. LES ANTIBIOTIQUES luttent contre les bactéries. Ils sont parfois produits par des micro-organismes naturels, tel *Penicillium notatum* (en haut à gauche), qui a permis à Fleming de découvrir la pénicilline. On teste le pouvoir des antibiotiques sur des cultures pures de bactéries, par exemple sur une souche de mycobactéries (en bas à gauche) ou de staphylocoques dorés (en haut à droite). Un antibiogramme (en bas à droite) révèle l'efficacité des antibiotiques sur une

bactérie. On dispose sur une culture de bactéries des pastilles de papier buvard imbibées d'antibiotiques (les taches de couleur). Quand l'antibiotique est efficace, la bactérie est détruite dans toute la zone où l'antibiotique diffuse (tache sombre autour de la pastille colorée). Au contraire, quand l'antibiotique est inefficace, on n'observe aucune inhibition de la croissance bactérienne autour de la pastille. Sur l'antibiogramme présenté, quatre des six antibiotiques testés sont efficaces.



2. LES ANTIBIOTIQUES agissent, par exemple, en empêchant l'ARN polymérase de décoder l'ADN et de fabriquer les molécules d'ARN (a), en empêchant les ribosomes de fabriquer les protéines bactériennes (b), ou en perturbant la construction de la paroi des bactéries, qui se vident alors de leur contenu ou ne peuvent plus se diviser (c).

tains bacilles pyocyaniques isolés dans divers hôpitaux, et qui causent de graves infections pulmonaires ou infectent les plaies des grands brûlés ; de certaines espèces de bactéries qui colonisent l'intestin, tel *Enterococcus faecium*, isolées aux États-Unis ; de certaines souches de staphylocoques dorés. Ces souches de staphylocoques multirésistantes aux antibiotiques sont très fréquentes en France, et la lutte contre leur propagation est une des priorités des autorités sanitaires.

Enfin, depuis quelques années, on a vu apparaître, notamment chez des malades atteints de SIDA, de petites épidémies de tuberculose dues à des souches de *Mycobacterium tuberculosis* multirésistantes aux antibiotiques. Des souches multirésistantes ont été sélectionnées chez ces patients traités par de grandes quantités d'antibiotiques.

Qu'est-ce qu'un antibiotique ? C'est une substance qui, à très faibles concentrations, empêche les bactéries de se multiplier ou qui les tue. Ceux dont on dispose aujourd'hui sont soit des antibiotiques naturels, quand ils sont fabriqués par des micro-organismes, tels

des champignons microscopiques, soit des antibiotiques hémisynthétiques, c'est-à-dire résultant de la transformation chimique de composés naturels, soit des antibiotiques entièrement issus de la synthèse chimique.

Au sein de chacun de ces trois grands groupes, des « familles d'antibiotiques » regroupent des composés dont les structures chimiques sont proches. Les antibiotiques utilisés en médecine sont infiniment moins toxiques – entre 1 000 et 1 000 000 de fois – pour les cellules des mammifères que pour les bactéries. Cette faible toxicité a facilité leur utilisation chez les malades.

Comment peut-on enrayer le développement des bactéries multirésistantes ? Pour l'expliquer, nous résumerons les mécanismes d'action des antibiotiques sur les souches sensibles, puis les mécanismes génétiques et écologiques responsables du développement des résistances.

Un antibiotique inhibe une des voies métaboliques indispensables à la survie des bactéries. Les cibles varient selon les familles, mais les antibiotiques inhibent souvent une enzyme. La molécule

d'antibiotique se fixe à l'endroit où devrait agir l'enzyme ou en inhibe l'activité. Certains antibiotiques inhibent les enzymes responsables de la synthèse de la paroi bactérienne, d'autres bloquent la machinerie responsable de la synthèse des protéines, d'autres enfin, musellent les enzymes qui participent à la transcription ou à la réplication de l'ADN. Dans l'ensemble, lorsque deux molécules antibiotiques appartiennent à la même famille, elles ont des cibles proches, voire identiques. En revanche, deux antibiotiques appartenant à des familles différentes agissent sur des cibles distinctes.

Les mécanismes de la résistance

Plusieurs mécanismes rendent une bactérie résistante. Dans certains cas, la bactérie devient imperméable à l'antibiotique, qui ne peut plus pénétrer pour atteindre sa cible : par exemple parce que les canaux qui perméabilisent la membrane bactérienne ne fonctionnent pas ou parce que l'antibiotique, après avoir pénétré normalement, est rapidement rejeté hors de la bactérie. Dans d'autres cas, la structure de l'antibiotique ou celle de sa cible sont modifiées de sorte que la liaison entre les deux molécules ne se fait plus. De telles modifications résultent du changement de la structure des protéines cibles ou de l'action d'une enzyme qui modifie, ou « détoxifie », l'antibiotique.

Lorsque ces mécanismes de résistance sont présents chez toutes les bactéries d'une espèce donnée, cette résistance est qualifiée de « naturelle » : elle existait avant l'utilisation des antibiotiques en médecine. Au contraire, lorsqu'une résistance apparaît à la suite de l'utilisation d'antibiotiques, elle est dite « acquise ». Naomi Datta, à Londres, a montré, que des bactéries prélevées sur des souches bactériennes datant du début du XX^e siècle étaient généralement sensibles aux antibiotiques.

Une bactérie sensible à un antibiotique acquiert un caractère de résistance quand son patrimoine génétique (la séquence de son ADN) change. Certaines de ces modifications sont des mutations ponctuelles, portant sur une seule base de la séquence nucléotidique, c'est-à-dire sur une seule lettre du message génétique. Lorsqu'une telle mutation survient dans un gène codant une protéine, sa structure ou son site

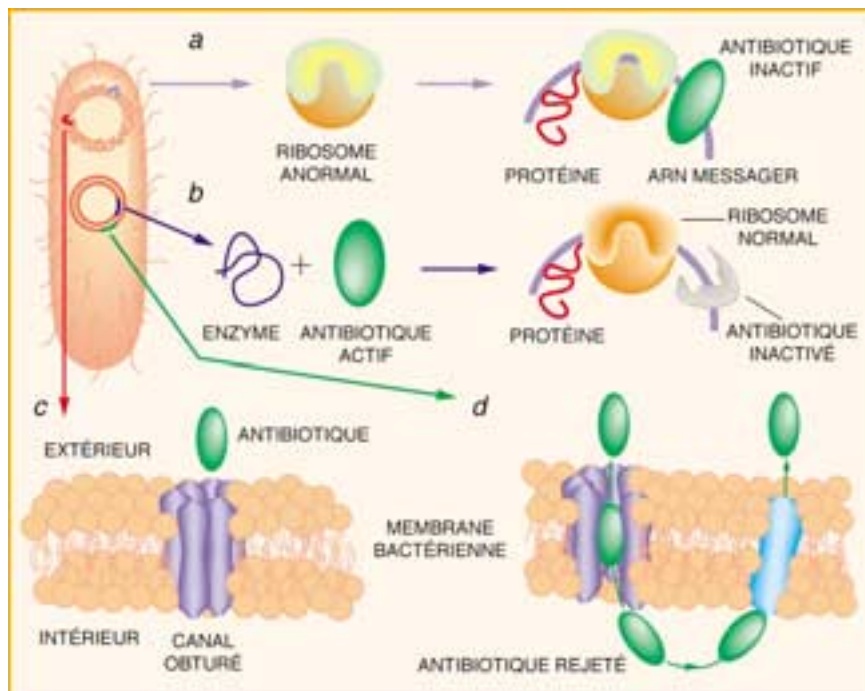
actif risquent d'être modifiés. L'antibiotique ne se lie plus à sa cible et la bactérie résiste au traitement.

La survenue et la localisation des mutations spontanées sont le fruit du hasard. On sait évaluer la fréquence statistique d'apparition des mutants résistants, laquelle est indépendante de la présence de l'antibiotique dans l'environnement. Ainsi, dans toute population bactérienne, une bactérie sur un million, voire sur un milliard, résiste à tel ou tel antibiotique. Cette bactérie, perdue dans l'environnement, ne risque pas de déclencher une infection. Au contraire, quand, chez un patient, cette population bactérienne est soumise à l'action d'un antibiotique, seul le mutant résistant subsiste. Débarrassé de ses rivaux, il se multiplie et finit par donner naissance à toute une population bactérienne résistante.

Cela s'est produit, en 1947, quand les premiers tuberculeux ont été traités par la streptomycine : leur état s'est rapidement amélioré, mais 80 pour cent d'entre eux ont rechuté, trois mois plus tard, à cause d'un bacille résistant à la streptomycine. On a alors associé plusieurs molécules antibiotiques appartenant à des familles différentes, à mesure de leur découverte. Aujourd'hui, on traite les tuberculeux par de telles associations, ce qui évite les rechutes. Malheureusement, le coût des traitements a augmenté.

Quand une bactérie devient résistante à un antibiotique, elle l'est également aux antibiotiques de la même famille, qui ont la même cible, mais elle reste sensible aux autres familles d'antibiotiques. La probabilité qu'une même bactérie soit résistante à deux antibiotiques est infime : ainsi, si la fréquence des mutations responsables de la résistance à la rifampicine est égale à 10^{-8} (une mutation sur 100 millions) et que celle de la résistance à l'acide fusidique est égale à 10^{-7} , la probabilité de survenue d'une bactérie résistante aux deux antibiotiques est le produit des deux probabilités, soit 10^{-15} (une mutation sur un million de milliard). Ainsi, en associant plusieurs antibiotiques, on prévient l'émergence de mutants résistants.

De même, on a récemment redécouvert l'intérêt d'associer plusieurs antiviraux pour traiter les patients infectés par le VIH, le virus de l'immunodéficience humaine. En associant trois antiviraux, qui inhibent deux pro-



3. LES RÉSISTANCES des bactéries aux antibiotiques résultent de mutations aléatoires dans le génome ou de la présence de gènes de résistance sur un plasmide (la structure circulaire) : dans certains cas, une mutation entraîne la synthèse d'un ribosome bactérien, que l'antibiotique ne reconnaît pas ; toutefois, ce ribosome continue à produire les protéines bactériennes (a). Certaines enzymes inactivent l'antibiotique, qui ne se fixe plus sur sa cible, ici le ribosome de la bactérie (b). Certaines mutations commandent la synthèse de canaux membranaires non fonctionnels : les canaux qui, normalement, permettent à l'antibiotique de pénétrer dans les bactéries, restent obturés (c). Enfin, dans de nombreuses bactéries résistantes, l'antibiotique traverse bien la membrane, mais est immédiatement expulsé(d).

teïnes virales indispensables à la répllication virale, la trithérapie semble juguler la multiplication du virus chez les patients séropositifs.

L'acquisition d'un mécanisme de résistance aux antibiotiques par mutation est un phénomène redoutable, mais cette résistance, due à une mutation, se transmet seulement «verticalement», d'une bactérie à sa descendance ; elle ne se transmet pas «horizontalement» d'une bactérie à une autre.

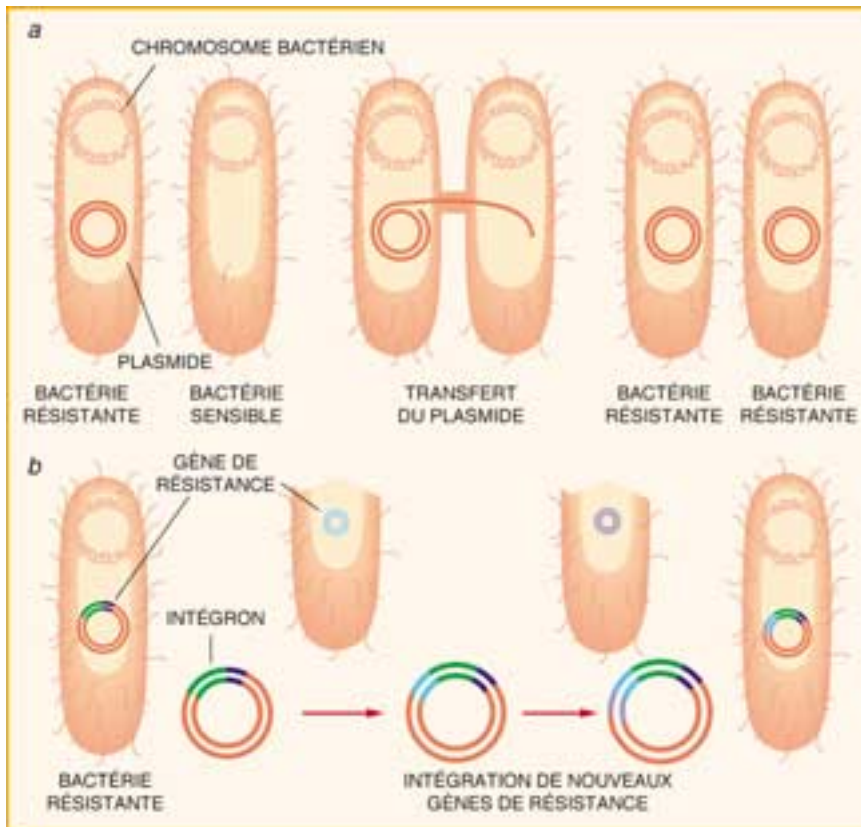
Transfert de plasmides

Un deuxième type de modification génétique rend les bactéries résistantes aux antibiotiques. Nous avons vu que la résistance résulte souvent de modifications, de la cible ou de l'antibiotique, dues à des enzymes détoxifiantes. Ces enzymes sont souvent codées par des gènes surnuméraires, normalement absents du patrimoine génétique des bactéries. Ces gènes, parfois localisés au sein du chromosome unique de la bactérie, sont majoritairement intégrés dans des éléments génétiques extrachromosomiques, les plasmides. N. Datta et ses collègues

ont montré que les plasmides existaient déjà dans les bactéries de l'«ère pré-antibiotique», mais que les gènes de résistance y étaient alors très rares.

Ainsi, des gènes présents dans des plasmides spécifient des enzymes qui inhibent les antibiotiques. Ces plasmides se dupliquent au même rythme que le chromosome bactérien et sont ainsi transférés à l'ensemble de la descendance de la bactérie qui les héberge. Quand une bactérie est résistante parce qu'elle contient un gène de résistance plasmidique, l'ensemble de la descendance portera le même plasmide et sera résistante. Comme les mutations chromosomiques, les gènes de résistance plasmidiques se transmettent verticalement. Toutefois, les plasmides peuvent aussi se transmettre «horizontalement», d'une bactérie à sa voisine, qu'elles soient ou non de la même espèce : les plasmides favorisent la dissémination de la résistance.

Au terme du transfert, nommé conjugaison, la bactérie donatrice et la bactérie réceptrice contiennent toutes les deux le plasmide et l'ensemble des gènes qu'il véhicule. Ce transfert est responsable de la dissémination rapide



4. LE TRANSFERT DE PLASMIDE est l'un des mécanismes de dissémination des résistances aux antibiotiques. Lorsque deux bactéries sont en contact, le plasmide contenu dans l'une des bactéries se duplique et la deuxième bactérie en reçoit une copie (a). Le plasmide contient parfois un intégron, un groupe de gènes qui favorisent l'intégration d'un ensemble de gènes extérieurs et leur expression. Quand le groupe de gènes intégrés contient plusieurs gènes de résistance, la bactérie devient, d'un seul coup, résistante à plusieurs antibiotiques (b). Le plasmide peut acquérir progressivement plusieurs groupes de gènes (en bleu clair, en mauve). La présence d'un intégron accélère notablement l'apparition des multirésistances.

des gènes de résistance au sein de populations bactériennes d'espèces différentes.

Dès les années 1960, on a découvert que des gènes de résistance différents sont souvent associés et adjacents sur les plasmides et qu'ils sont transférés ensemble d'une bactérie à l'autre. Ce transfert en bloc est dû à la présence, dans certains plasmides d'intégrons, des structures spécifiques qui ouvrent la porte du plasmide, permettant à un ensemble de gènes de s'y insérer. Une fois intégrés dans le plasmide, les gènes de résistance trouvent les éléments nécessaires à leur expression.

Le transfert de plasmides a de graves conséquences sur la dissémination de la résistance. Les plasmides et les intégrons font qu'une bactérie peut devenir résistante à de nombreux antibiotiques, et toutes les résistances acquises risquent d'être transférées, en bloc, à d'autres bactéries. Qui plus est, un antibiotique risque de sélectionner des populations bactériennes qui résistent d'emblée à plusieurs familles d'antibiotiques.

Après avoir élucidé les mécanismes de transmission des résistances, les biologistes se sont demandé d'où provenaient les gènes de résistance. Nous avons souligné que la survenue de mutations ponctuelles est un phénomène constant, spontané et aléatoire. En revanche, la formation d'un gène de résistance complet et fonctionnel est le fruit d'une longue évolution. De tels gènes n'ont pu apparaître en 50 ans, c'est-à-dire depuis le début de l'utilisation thérapeutique des antibiotiques.

En 1970, des biologistes émettent l'hypothèse que les gènes de résistance préexistent dans les micro-organismes qui produisent spontanément des antibiotiques dans les écosystèmes naturels.

En effet, sans cette protection conférée par les gènes de résistance, les micro-organismes producteurs s'autodétruiraient. Cette hypothèse a d'abord été vérifiée chez *Streptomyces* qui produit les antibiotiques de la famille des aminosides. Raoul Benveniste et Julian Davies, de l'Université

du Wisconsin, ont retrouvé, dans certaines de ces souches, des enzymes analogues à celles qui confèrent aux bactéries pathogènes pour l'homme la résistance aux antibiotiques.

Récemment, Juan Coque et ses collègues de l'Université de León, en Espagne, ont mis en évidence le même phénomène chez la bactérie *Nocardia*, qui produit une céphalosporine – un antibiotique d'une famille apparentée à celle de la pénicilline. Néanmoins, on ignore encore l'origine de nombreux gènes de résistance. On sait seulement que les antibiotiques n'ont pas créé de nouveaux gènes ni de nouvelles bactéries ; ils ont seulement favorisé la sélection et la dissémination des bactéries qui portent les gènes de résistance.

L'écologie de la résistance

Ainsi, les gènes de résistance aux antibiotiques préexistent dans l'environnement. Comment sont-ils transférés à l'homme ? Depuis une dizaine d'années, deux d'entre nous (A. Andreumont et D. Corpet), avec Pierre Raibaud et Cyrille Tancrède, cherchent à évaluer le rôle que l'écosystème bactérien du tube digestif joue dans l'évolution des phénomènes de résistance.

La flore intestinale participe à l'évolution de la résistance aux antibiotiques de certaines bactéries, telles que les entérobactéries et les entérocoques. En effet, le tube digestif est le lieu privilégié de la rencontre entre de grandes quantités d'antibiotiques et des populations bactériennes nombreuses et diversifiées. Lorsqu'un traitement antibiotique est administré par voie orale, une fraction seulement de la dose est absorbée par la muqueuse intestinale et rejoint la circulation sanguine générale ; les divers organes irrigués par le sang sont ainsi traités contre l'infection. Le reste de la dose descend dans le tube digestif. Ce flux est augmenté d'une fraction de la dose absorbée, qui est excrétée par les voies biliaires dans la lumière intestinale. Ce mécanisme de rejet par le foie d'une fraction notable des médicaments explique que, même après administration des antibiotiques par voie intraveineuse ou intramusculaire, le produit se retrouve en concentration notable dans l'intestin.

Le tube digestif est peuplé de bactéries, peu nombreuses dans la partie supérieure, l'intestin grêle, mais très

concentrées dans la partie inférieure, le côlon, où leur nombre est estimé à cent mille milliards, soit dix fois plus que le nombre total de cellules contenues dans l'organisme humain. La flore intestinale est composée de plusieurs centaines d'espèces bactériennes différentes. Malgré la diversité des micro-organismes qui composent l'écosystème intestinal, la composition de cette flore est stable entre les individus d'une même espèce.

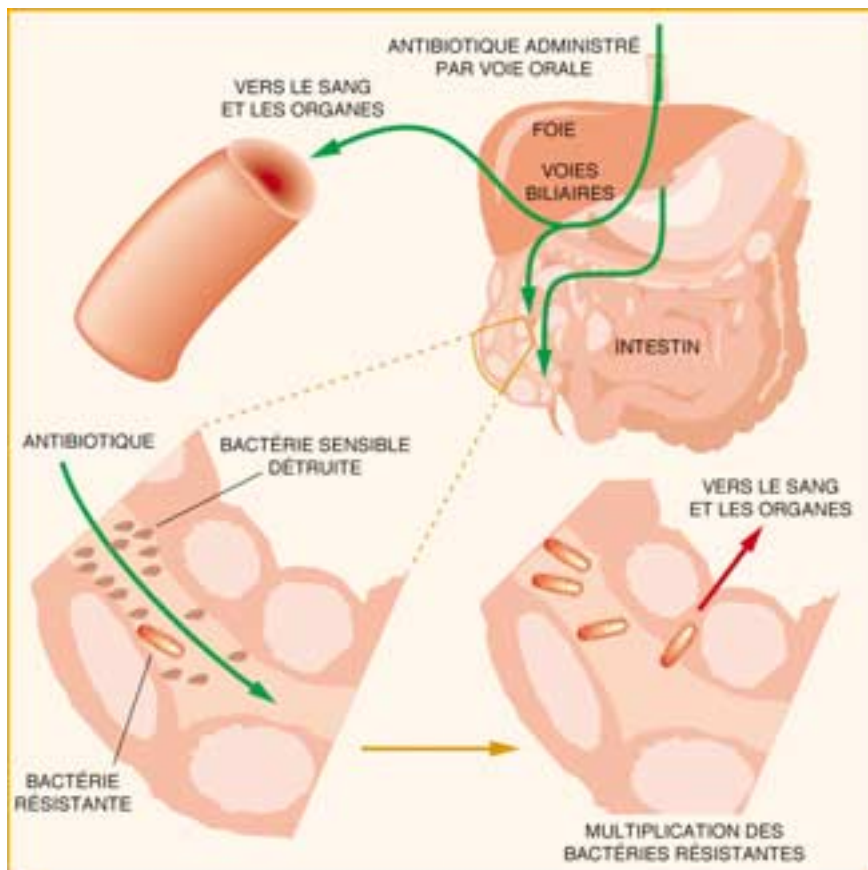
Les espèces bactériennes les plus abondantes de la flore intestinale jouent un rôle physiologique important : elles maintiennent l'homéostasie, c'est-à-dire l'équilibre, de l'écosystème microbien du tube digestif en empêchant de nouvelles espèces de s'implanter durablement. Pierre Raibaud et Robert Ducluzeau, de l'INRA, ont nommé ce mécanisme l'«effet de barrière». À côté de la protection qu'elle confère contre l'intrusion durable de micro-organismes éventuellement pathogènes, cette régulation prévient la multiplication excessive de certaines espèces bactériennes de la flore intestinale, notamment celles qui, comme les entérobactéries et les entérocoques, risquent de provoquer des infections chez des sujets immunodéprimés.

Chez les personnes saines, la concentration de ces espèces dans la flore intestinale ne dépasse pas une bactérie sur 10 000. On ignore le rôle physiologique, chez les sujets sains, d'espèces bactériennes dont la concentration, dans le tube digestif, est si faible.

L'effet de barrière résulterait d'une compétition entre espèces de bactéries qui se disputeraient un nombre limité de sites d'attachement sur la muqueuse intestinale ou des nutriments en quantité insuffisante.

On étudie expérimentalement l'effet de barrière en observant la flore intestinale de souris axéniques, c'est-à-dire élevées en milieu stérile. On introduit dans leur tube digestif des bactéries sélectionnées pour leur résistance à tel ou tel antibiotique, et l'on observe comment ces bactéries se multiplient et comment leurs gènes de résistance s'échangent avec les bactéries de la flore intestinale.

Certains antibiotiques rompent l'équilibre assuré par l'effet de barrière : quand les antibiotiques actifs sont en concentration élevée dans le côlon et que leur spectre d'action est large, ils perturbent le métabolisme des bactéries intestinales qui assu-



5. LORS D'UN TRAITEMENT, une fraction seulement de l'antibiotique administré est absorbée par la muqueuse intestinale et atteint le sang ; le reste descend dans l'intestin. En outre, une partie de la dose absorbée est excrétée par les voies biliaires et rejoint aussi la lumière intestinale. Ainsi, les antibiotiques sont parfois en concentration notable dans le tube digestif, et y détruisent les bactéries sensibles, sélectionnant les bactéries résistantes éventuellement présentes ; celles-ci risquent de traverser la muqueuse intestinale et d'engendrer une infection grave, surtout si les défenses immunitaires du patient sont affaiblies.

rent l'effet de barrière. Les bactéries résistantes, dont les concurrentes sont moins efficaces, se multiplient plus rapidement.

Les infections dues aux bactéries intestinales

Or, les bactéries ne restent pas toujours cantonnées dans le tube digestif, surtout chez les personnes dont les défenses immunitaires sont affaiblies. Rodney Berg, de l'Université de Shreveport, a nommé «translocation» le mécanisme qui autorise certaines bactéries de la flore du tube digestif à traverser la muqueuse intestinale et à contaminer d'autres organes. La translocation bactérienne a d'importantes conséquences cliniques. Par exemple, nous avons montré, avec C. Tancrede, que ce mécanisme est responsable de la quasi-totalité des infections dues à des bactéries intestinales qui surviennent chez les patients cancéreux durant les périodes d'immunodépression

grave qui suivent les chimiothérapies. Ainsi, quand un phénomène de résistance apparaît au sein de l'immense masse des bactéries de la flore intestinale et que des bactéries résistantes s'échappent de l'intestin pour envahir le sang, elles déclenchent de graves infections.

De plus, les bactéries isolées lors d'infections graves chez les malades hospitalisés d'une même ville résistent presque aux mêmes antibiotiques que les entérobactéries de la flore intestinale de sujets sains qui vivent dans la même ville (on dit qu'ils ont le même spectre de résistance).

Les bactéries résistantes sont-elles fréquentes dans la flore intestinale des sujets sains ? Oui, surtout vis-à-vis des antibiotiques utilisés depuis plusieurs dizaines d'années, par exemple l'ampicilline ou les tétracyclines. On constate aussi que de nombreuses souches sont résistantes à des molécules qui ont été très utilisées, mais dont l'emploi a cessé en raison de leur toxi-

ANTIBIOTIQUE	MODE D'ACTION	MECANISMES DE RESISTANCE
PENICILLINE	Bloque la synthèse de la paroi	Destruction de l'antibiotique par des enzymes Diminution de la perméabilité de la membrane bactérienne
CEPHALOSPORINE	Bloque la synthèse de la paroi	
STREPTOMYCINE	Bloque la synthèse des protéines	Modification de la cible par mutation Modification de l'antibiotique par des enzymes
RIFAMPICINE	Bloque la synthèse de l'ARN	Modification de la cible par mutation
ACIDE FUSIDIQUE	Bloque la synthèse des protéines	
VANCOMYCINE	Bloque la synthèse de la paroi	Modification de la cible

6. LES BACTERIES RESISTANT à ces antibiotiques sont fréquentes. On a indiqué plusieurs antibiotiques souvent utilisés, leurs modes d'action et de résistance.

cité, par exemple le chloramphénicol et ses dérivés.

La présence de si nombreuses bactéries résistantes au sein de la flore intestinale serait un phénomène récent. Plusieurs équipes de microbiologistes ont cherché s'ils retrouvaient de telles bactéries résistantes chez les populations humaines isolées qui n'avaient jamais, ou quasi jamais, été traitées par des antibiotiques. Les bactéries résistantes y sont beaucoup moins fréquentes que dans les populations traitées par les antibiotiques.

Aujourd'hui, la fréquence de portage des bactéries résistantes varie d'un pays à l'autre. Ainsi, les enfants vivant à Boston, aux États-Unis, ont moins souvent de bactéries résistantes dans leur flore intestinale que les enfants vivant à Caracas, au Pérou, ou à Qin-Pu, en Chine : une mauvaise maîtrise de la prescription des antibiotiques et une hygiène médiocre favoriseraient la transmission des bactéries résistantes. En Île-de-France, la fréquence de portage de bactéries résistantes dans le tube digestif d'adultes sains est assez élevée, proche de celle que l'on trouve dans un pays moins développé, tel que la Jordanie.

La fréquence de colonisation du tube digestif par des bactéries résistantes est stable dans le temps. Ainsi, la fréquence des bactéries résistantes dans la région parisienne n'est pas notablement différente, aujourd'hui, de celle qu'avait trouvée Françoise Lemozy, à Toulouse, il y a 20 ans.

Aussi l'administration d'antibiotiques favorise-t-elle la colonisation de l'intestin par des bactéries résistantes. D'après les résultats que nous avons

obtenus, plus les traitements antibiotiques se prolongent et plus le risque de colonisation augmente. En outre, le risque qu'une personne soit colonisée par des bactéries résistantes, même si elle ne consomme pas, elle-même, d'antibiotique, augmente quand cette personne vit dans une communauté où les antibiotiques sont abondamment prescrits. La transmission aurait lieu par voie orale d'une personne à l'autre, par l'eau ou par des aliments contaminés.

Cette relation semble exister aussi pour les animaux : l'équipe de Stuart Levy, à Boston, a montré que des singes vivant en Afrique à distance de toutes populations humaines sont moins souvent colonisés par des entérobactéries résistantes aux antibiotiques que leurs congénères qui vivent près des villes et qui se nourrissent partiellement sur les décharges citadines.

De surcroît, des échanges semblent se produire entre les bactéries intestinales qui colonisent les animaux et celles qui envahissent le tube digestif des hommes vivant dans la même région. Ainsi, les agriculteurs ou les personnes qui vivent à proximité des fermes, où l'on manipule des antibiotiques, portent plus souvent que la population générale des bactéries intestinales résistantes. Or, depuis les années 1950, les antibiotiques sont utilisés à faibles doses comme additifs alimentaires en élevage industriel pour promouvoir la croissance des animaux. Ces antibiotiques inhiberaient les bactéries qui dégradent les acides aminés dans l'intestin, ce qui améliorerait le pouvoir nutritif des aliments.

De l'alimentation animale à la résistance humaine

Des bactéries qui résistent aux antibiotiques utilisés chez l'animal circuleraient entre les animaux et l'homme, notamment par l'intermédiaire d'aliments contaminés. Ces bactéries sont responsables de l'essentiel des infections alimentaires qui surviennent dans les collectivités : en France, entre 10 et 30 pour cent de ces infections seraient d'origine animale. Dans certains cas, les bactéries en cause résistent aussi aux antibiotiques utilisés pour l'homme.

En collaboration avec l'Unité des agents antibactériens de l'Institut Pasteur, Elisabeth Chaslus-Dancla et son équipe de l'INRA ont caractérisé, chez des souches isolées sur des bovins, en 1984, un gène de résistance à un antibiotique utilisé en élevage : l'apramycine. L'utilisation de cet antibiotique était réservée à l'usage animal pour ne pas sélectionner de bactéries résistantes pathogènes pour l'homme. Malheureusement, le gène conférant la résistance à l'apramycine confère aussi une résistance à un antibiotique de la même famille – la gentamicine – très utilisé chez l'homme : l'utilisation de l'apramycine a sélectionné un mécanisme de résistance à la gentamicine.

Des gènes de résistance à une autre famille d'antibiotiques, les glycopeptides, ont été caractérisés. Les souches porteuses d'un ensemble de gènes qui confèrent la résistance à cette famille d'antibiotiques ont été responsables d'épidémies parfois dramatiques dans certains hôpitaux américains. La famille des glycopeptides comporte à la fois la vancomycine et la teicoplanine, prescrites en médecine humaine dans certaines infections graves, et l'avoparcine utilisée comme promoteur de croissance chez de nombreuses espèces animales. Or, quand une bactérie est résistante à l'avoparcine, elle l'est aussi à la vancomycine.

En Europe, des quantités notables d'avoparcine sont utilisées dans les élevages, de sorte que des bactéries résistantes sont sélectionnées, et éventuellement transmises à l'homme. Au contraire, aux États-Unis, l'avoparcine n'est pas utilisée comme promoteur de la croissance animale. Les infections humaines dues à des bactéries résistantes aux glycopeptides y sont 10 fois plus fréquentes qu'en Europe ; leur survenue n'est imputable qu'à l'utilisation de cette famille d'antibiotiques en médecine.

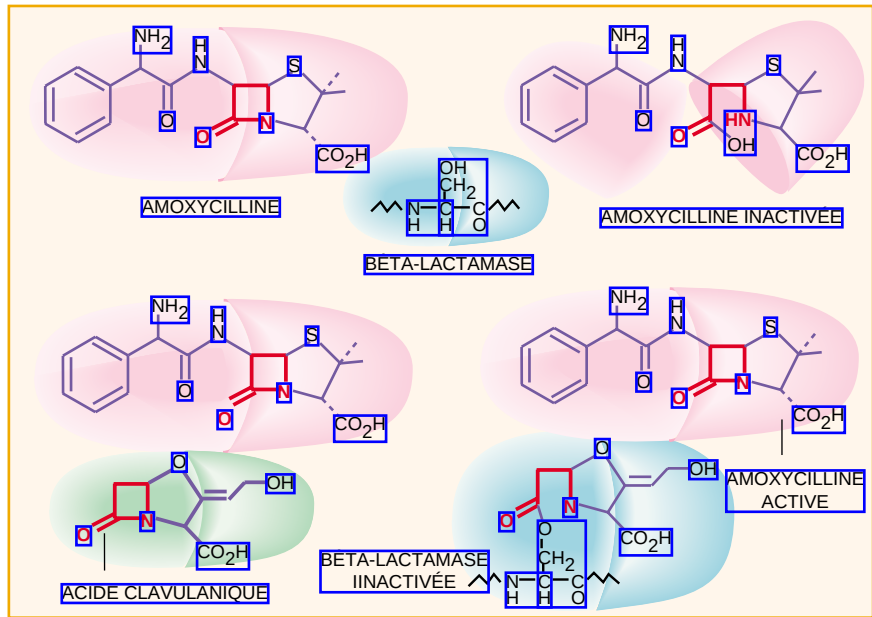
cine humaine. Toutefois, l'avoparcine est interdite dans l'alimentation des vaches laitières, en Europe, depuis 1995, et devrait l'être prochainement pour les porcs et les volailles.

La flore intestinale de volontaires sains contient beaucoup moins de bactéries résistantes quand ils absorbent une alimentation stérile que s'ils s'alimentent normalement. Cette expérience apporte un argument supplémentaire en faveur de l'origine alimentaire de nombreuses bactéries résistantes de la flore intestinale de l'homme. Les légumes, souvent consommés crus, apportent plus de bactéries résistantes que la viande, généralement cuite avant d'être consommée.

Heureusement, l'effet de barrière est efficace chez l'homme. Dans la plupart des cas, les bactéries résistantes transitent dans le tube digestif sans s'implanter durablement. Toutefois, des expériences réalisées à l'Institut Pasteur de Paris et à l'INRA ont montré que ce simple transit permet parfois le transfert des résistances à des bactéries sensibles de la flore normale, même si la bactérie en transit n'est pas de la même espèce que celles de la flore intestinale.

Les additifs utilisés dans l'alimentation animale jouent-ils un rôle dans l'apparition des phénomènes de résistance aux antibiotiques chez les bactéries qui infectent l'homme? Est-ce l'usage des antibiotiques dans l'alimentation animale ou en médecine humaine qui est responsable de la multiplication des résistances? Lequel de ces usages doit-on limiter? Le débat n'est pas clos. Les intérêts économiques sont considérables : ainsi, aux États-Unis, la consommation hospitalière de vancomycine est passée de 13 millions de dollars à 300 millions (65 à 1 500 millions de francs), entre 1982 et 1995.

L'ampleur des marchés ne contribue pas à la sérénité du débat. Toutes ces données soulignent l'importance du risque que représente l'évolution des résistances bactériennes aux antibiotiques. Pour chaque traitement antibiotique, le médecin doit évaluer le bénéfice thérapeutique pour son patient et les risques que représente, pour la collectivité, la sélection de bactéries résistantes. Quelles sont les solutions envisageables? Sans doute pourrait-on réduire la durée des traitements antibiotiques, afin de diminuer les quantités prescrites et, par là même, les risques de sélectionner des bactéries résistantes ; on diminuerait



7. LA BETA-LACTAMASE est une enzyme bactérienne qui inactive certains antibiotiques, notamment l'amoxycilline. En administrant, en même temps que l'antibiotique, l'acide clavulanique, une molécule qui se fixe à la bêta-lactamase et l'inhibe, on l'empêche d'agir et l'amoxycilline libérée dans l'organisme reste efficace. C'est une des façons de déjouer les mécanismes de résistance des bactéries aux antibiotiques.

la «pression de sélection». Comme les durées minimales de traitement ne sont connues avec précision que pour un petit nombre d'infections, un vaste champ d'études cliniques est ouvert.

À l'hôpital, la gravité de la situation représentée par les infections nosocomiales à bactéries multirésistantes a conduit les autorités sanitaires à mettre en place des comités de lutte contre ces infections qui regroupent des médecins, des microbiologistes, des épidémiologistes, des hygiénistes et les services administratifs. Des règles d'hygiène élémentaires, par exemple un lavage soigneux des mains après chaque soin aux malades et l'isolement des malades porteurs de bactéries multirésistantes éviteraient la transmission de ces bactéries d'un patient à l'autre ; simples et efficaces, ces mesures sont toutefois contraignantes.

De surcroît, bien que de nouvelles molécules aient été mises sur le marché, aucune nouvelle famille d'antibiotiques n'a été découverte au cours des 20 dernières années. Les laboratoires pharmaceutiques recherchent d'autres voies métaboliques indispensables à la multiplication des bactéries et qui seraient de nouvelles cibles thérapeutiques. Après avoir identifié ces cibles, ils pourraient concevoir des molécules qui les bloqueraient spécifiquement.

Depuis la découverte de la pénicilline, on a assisté à la prolifération de

bactéries qui résistent aux antibiotiques. Seule une action concertée entre les médecins, le personnel soignant, les vétérinaires, les agronomes, l'industrie pharmaceutique et les autorités de santé parviendra à maîtriser l'évolution de la résistance bactérienne aux antibiotiques, et empêchera que les fléaux d'antan ne réapparaissent.

Antoine ANDREMONT dirige le Laboratoire de bactériologie du groupe hospitalier Bichat-Claude Bernard – Université Paris VII. Denis CORPET dirige le Laboratoire sécurité et hygiène des aliments, à l'École nationale vétérinaire de Toulouse. Patrice COURVALIN dirige l'Unité des agents antibactériens et le Centre national de référence des antibiotiques de l'Institut Pasteur, à Paris.

D. CORPET, *Antibiotic Resistance from Food*, in *New England Journal of Medicine*, vol. 318, pp. 1206-1207, 1988.

Stuart LEVY, *The Antibiotic Paradox : how Miracle Drugs are Destroying the Miracle*, Plenum Press, 1992.

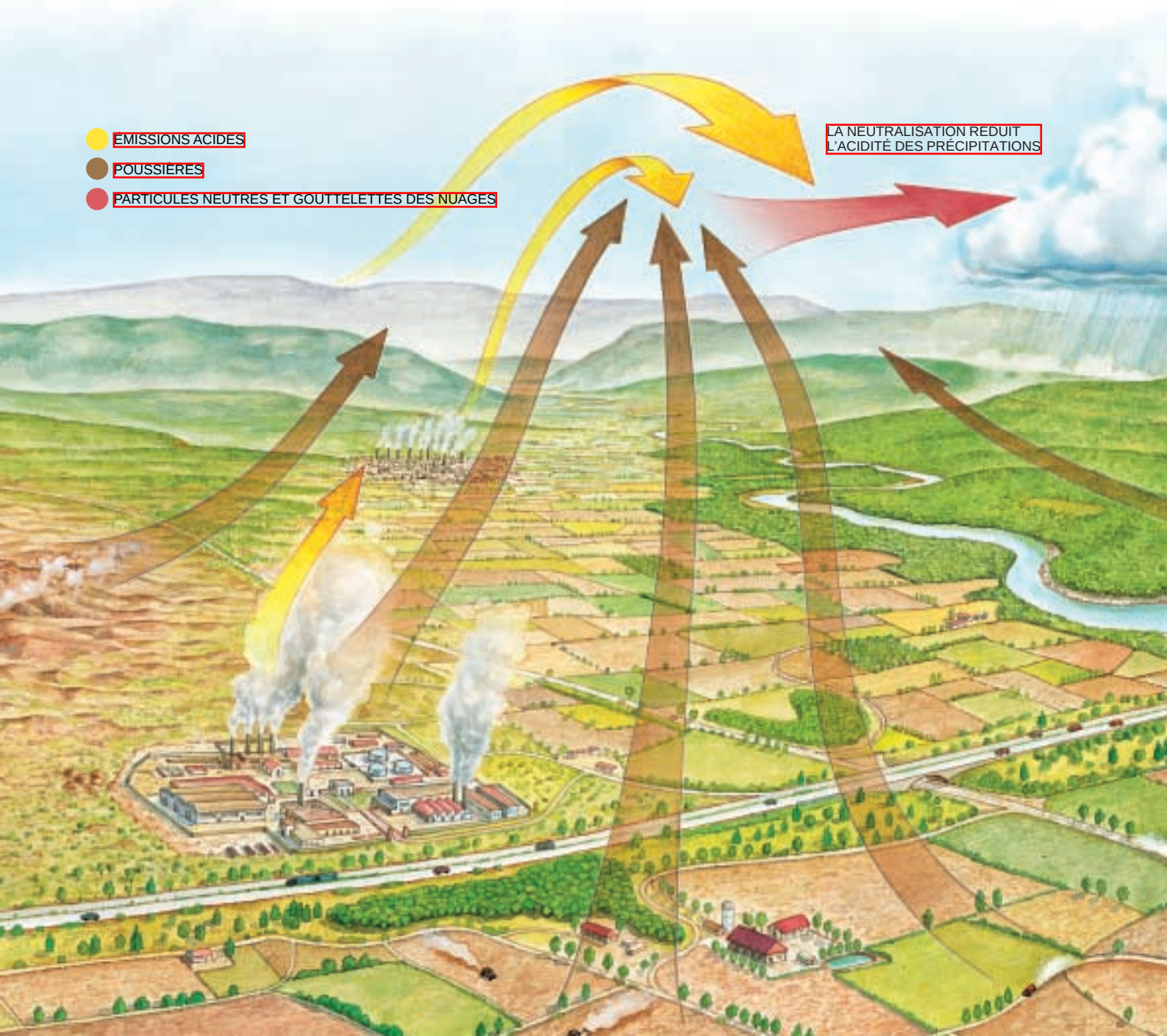
A. ANDREMONT et D. CORPET, *Colonisation intestinale par les bactéries résistant aux antibiotiques*, in *Encyclopédie Medico-Chirurgicale, Maladies infectieuses*, Elsevier, Paris, 800 - 1 - A - 10, 5 pp., 1996.

P. COURVALIN, *Evasion of Antibiotic Action by Bacteria*, in *J. Antimicrob. Chemother*, vol 37, pp. 855-869, 1996.

Poussières atmosphériques et pluies acides

LARS HEDIN • GENE LIKENS

Pourquoi les pluies restent-elles acides alors que les réglementations ont conduit à des réductions considérables des pollutions industrielles ? Les poussières atmosphériques semblent être en cause.



Depuis plusieurs décennies, les agronomes et les chimistes se préoccupent des pluies acides et de leurs conséquences sur l'environnement. Les effets délétères de cette acidité étant établis, les gouvernements de nombreux pays industrialisés ont réglementé les rejets des polluants dans l'atmosphère. L'Europe, par exemple, a limité les rejets de dioxyde de soufre et de dioxyde d'azote au moment même où les États-Unis ont adopté une loi pour un air propre. On espérait que de telles mesures favoriseraient la régénération des forêts et des lacs, mais le problème des pluies acides demeure : pourquoi les précipitations qui atteignent certaines parties de l'Europe et le Nord des États-Unis restent-elles acides, alors que la pollution est progressivement réduite ? Et pourquoi certains écosys-

tèmes, telles les forêts, sont-ils plus endommagés qu'on ne le craignait ?

Les spécialistes de l'atmosphère ont récemment découvert que le mécanisme des pluies acides était beaucoup plus complexe qu'ils ne le soupçonnaient : ils avaient notamment sous-estimé l'effet des composés atmosphériques basiques, qui peuvent contrebalancer les effets des polluants acides. Alors qu'on s'attachait à réduire les rejets de composés acides, on oubliait de tenir compte de la raréfaction simultanée des produits basiques : la diminution de la charge basique de l'atmosphère a aggravé les conséquences écologiques des pluies acides. Ainsi, paradoxalement, les mesures prises pour améliorer la qualité de l'air figurent parmi les principales causes des atteintes écologiques récentes.

On mesure l'acidité des composés

en unités pH (c'est une mesure de la concentration en ions hydrogène) : les solutions de pH inférieur à 7 sont acides, celles de pH supérieur à 7 sont basiques, et celles de pH égal à 7 sont neutres. Le jus d'orange, le vinaigre ou le vin sont acides, tandis que l'ammoniaque, la soude et les pansements gastriques sont basiques. Dans l'atmosphère, la plupart des composés basiques sont en suspension dans les particules de poussière, car ces dernières sont particulièrement riches en minéraux tels que le carbonate de calcium ou le carbonate de magnésium, qui se transforment en composés basiques lors de leur dissolution dans l'eau.

Les poussières atmosphériques proviennent de sources variées, telles la combustion des combustibles fossiles et des activités industrielles comme la fabrication du ciment, l'extraction minière ou la métallurgie. Les industries du bâtiment et l'agriculture dégagent également beaucoup de poussières basiques, tout comme les feux de forêts ou l'érosion éolienne des régions arides.

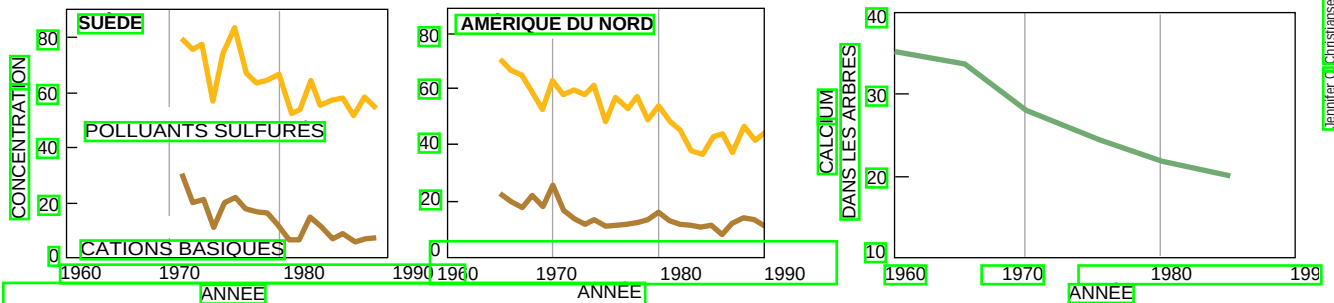
Un anti-acide naturel

Dans l'air, les particules de poussière neutralisent les pluies acides, à la façon de pansements gastriques dans l'estomac : lorsqu'un acide et une base se rencontrent, ils réagissent et engendrent un sel plus neutre. Dans l'atmosphère, cette neutralisation se produit lorsque les particules de poussière se dissolvent dans les gouttelettes acides qui constituent les nuages ou lorsqu'elles se combinent directement avec des acides sous forme gazeuse, tels le dioxyde de soufre ou le dioxyde d'azote. Ces réactions libèrent des cations, c'est-à-dire des atomes ou des groupes d'atomes qui, ayant perdu des électrons, sont char-

1. LES POUSSIÈRES de l'atmosphère (flèches brunes) contiennent des composés basiques, qui neutralisent les polluants acides (flèches jaunes) responsables des pluies acides. Les rejets des usines, l'agriculture ou la circulation sur les chemins de terre engendrent ces poussières, ainsi que les feux de forêts ou l'érosion par le vent. Les polluants acides proviennent essentiellement de la combustion des combustibles d'origine fossile dans les usines, les véhicules et les logements. Les particules de poussières apportent des éléments nutritifs aux forêts, mais elles provoquent également des troubles respiratoires quand leur concentration dans l'atmosphère est excessive.



Roberto Ossi



2. LES DIMINUTIONS SIMULTANÉES des quantités de polluants soufrés acides et des cations basiques qui les neutralisent se sont compensées pour réduire à presque rien les bénéfices écologiques attendus de la diminution des émissions de polluants acides. On a

notamment observé que les cations basiques étaient raréfiés dans les arbres des forêts du New Hampshire, ces dix dernières années. De telles raréfactions affaiblissent les forêts, parce qu'elles les privent d'éléments nutritifs.

gés positivement (simultanément se forment des anions, négativement chargés).

Les cations basiques réduisent l'acidité des précipitations, et ils atténuent également les effets des pluies acides dans les sols : là, les petites particules d'argile et l'humus (composé de matière organique végétale en décomposition) contiennent des ions négatifs, qui attirent les ions calcium

ou magnésium. Ainsi, le sol est une réserve naturelle de cations basiques qui, lorsqu'il est exposé aux ions hydrogène des pluies acides, limite l'acidité de l'eau qui percole en échangeant les ions hydrogène de cette dernière contre ses cations basiques (dans certains sols, les pluies acides provoquent en outre la dissolution d'ions aluminium toxiques qui déplacent les cations basiques).

Ce mécanisme d'échanges d'ions protège normalement les forêts contre les effets néfastes des pluies acides, mais il n'agit plus lorsque les réserves naturelles en cations s'épuisent, parce que le sol a été excessivement arrosé par les pluies acides. Ainsi, dans certaines régions d'Europe et d'Amérique du Nord, les ions hydrogène et aluminium ont déplacé une grande partie des cations basiques, augmenté la concentration en aluminium et acidifié le sol. De surcroît, les sols acides ne protègent plus des ruissellements acides les écosystèmes situés en aval : l'eau qui les traverse se charge d'ions hydrogène et aluminium, qui empoisonnent les rivières, les lacs et les fleuves.

Les particules de poussière ont un autre rôle important, car elles contiennent des éléments comme le calcium, le magnésium, le sodium et le potassium, qui sont des éléments nutritifs essentiels pour de nombreuses plantes. Non seulement les pluies acides arrachent ces éléments aux argiles et aux humus, mais elles les entraînent dans les lacs et les rivières, appauvrissant ainsi l'écosystème.

Naguère, seuls le Suédois Hans Egner et l'Anglais Eville Gorham avaient imaginé que l'atmosphère puisse être la principale source de cations basiques du sol ; on supposait plutôt que les cations se renouvelaient régulièrement dans les sols en raison d'une lente dissolution des minéraux des roches profondes, lors de l'érosion. Des études récentes ont bouleversé la théorie de la régénération des cations dans les sols. Dans la plupart des cas, l'atmosphère semble être la principale source de cations, de sorte que de nombreuses forêts seraient plus sensibles à la composition de l'atmosphère que les agronomes ne le pensaient.

Les poussières en France

La France et plusieurs pays européens ont considérablement réduit leurs émissions de polluants (oxydes de soufre, d'azote, poussières) contribuant au phénomène général de retombées acides.

Les courbes ci-contre présentent

les émissions de dioxyde de soufre (SO_2), d'oxydes d'azote (NO et NO_2) et de poussières en France. Les valeurs maximales sont de l'ordre de 3 900 000 tonnes par an pour le dioxyde de soufre, de 1 650 000 tonnes par an pour les oxydes de soufre, de 650 000 tonnes par an pour les poussières.

Pour le dioxyde de soufre, les émissions ont été globalement réduites de plus de quatre fois entre 1960 et 1994, essentiellement en raison des économies d'énergie, du développement de l'usage du gaz naturel et du développement de l'énergie nucléaire.

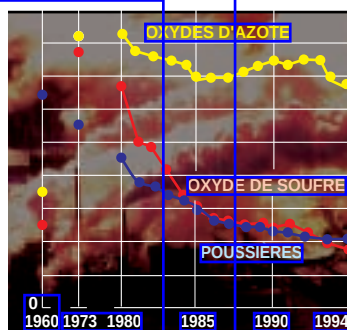
Pour les oxydes d'azote, les émissions globales n'ont diminué que

de 15 pour cent, entre 1973 et 1994. Les émissions par les sources fixes ont diminué dans un rapport 2, tandis que les émissions par le trafic automobile ont augmenté de 17 pour cent dans cette même période.

Pour les poussières, les émissions (toutes sources confondues) ont diminué dans un rapport de 3,2 : en retirant les émissions par les sources mobiles (diesel) qui ne présentent pratiquement aucun caractère basique, le rapport de réduction est alors de 5.

On estime généralement que la part de responsabilité des oxydes d'azote dans les dépôts acides est de l'ordre de 15 pour cent. Il est donc vrai que la France a considérablement diminué à la fois ses émissions acides et ses émissions de poussières.

Rémy BOUSCAREN – Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique



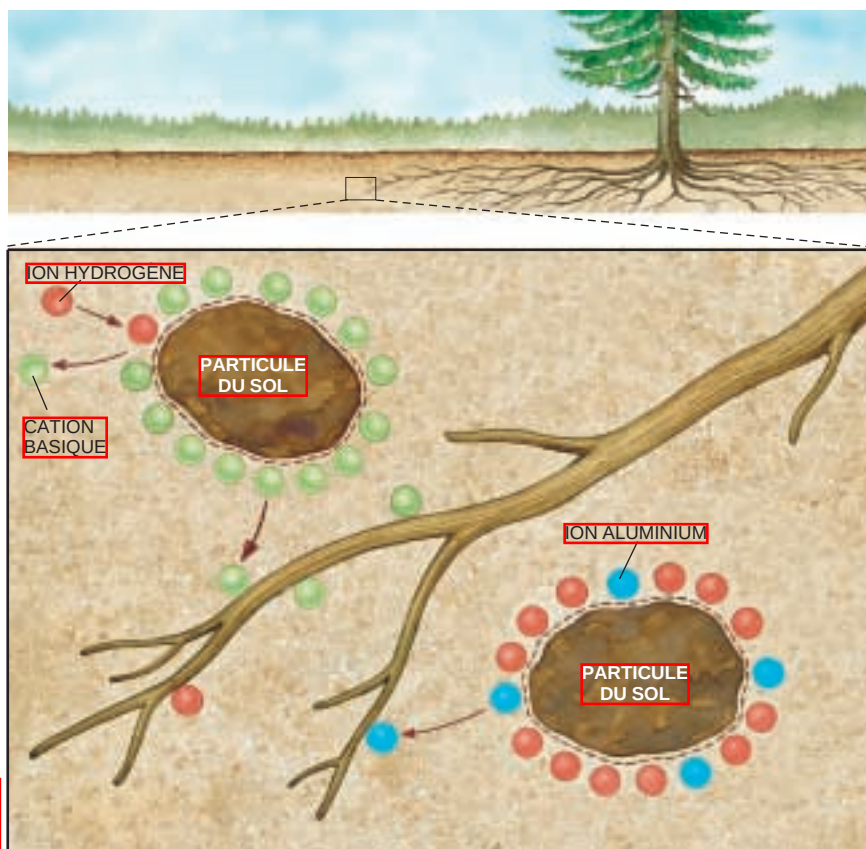
Moins de poussières, plus de dégâts

Les réductions des émissions de polluants acides ont initialement donné des résultats encourageants : au cours des trois dernières décennies, les concentrations en dioxyde de soufre ont spectaculairement chuté dans l'atmosphère de la plus grande partie de l'Europe et de l'Est de l'Amérique du Nord. Toutefois nous étions étonnés que les bilans des premières mesures ne tiennent pas compte des éléments basiques de l'atmosphère ; aussi nous avons décidé d'étudier l'impact des nouvelles réglementations sur la quantité de poussières rejetées dans l'atmosphère, afin de mieux mesurer leur impact réel sur la croissance des forêts et sur la réduction des effets des pluies acides.

Les États luttent contre les rejets de poussières dans l'atmosphère, parce que l'inhalation d'air pollué provoque des troubles respiratoires et que les poussières causent des problèmes écologiques variés. Depuis 20 ans, les gouvernements européens et américains ont défini les quantités admissibles pour chaque type de particules, mais les États-Unis n'ont pas tenu compte des réglementations sur les polluants acides. Quels ont été les effets de ces mesures ? Pour le savoir, nous avons réexaminé les analyses anciennes des précipitations dans le Nord-Est de l'Amérique et dans l'Ouest de l'Europe. Les concentrations en cations basiques dissous dans l'eau de pluie et dans la neige renseignent sur la concentration en minéraux basiques dans l'atmosphère et sur l'arrivée de ces cations dans les écosystèmes forestiers : la quantité de cations basiques a considérablement chuté pendant les 10 à 30 dernières années.

En Europe, la plus longue série d'enregistrements fiables, effectuée dans la région forestière de Sjöängen, au Sud de la Suède, révèle une chute de la concentration en cations, qui atteint 74 pour cent depuis 1971. Cette raréfaction brutale des cations basiques, dans de grandes régions européennes, a été confirmée par d'autres mesures, aux États-Unis.

Cette raréfaction des poussières basiques dans l'atmosphère a-t-elle contrecarré, voire annulé les bénéfices environnementaux de la réduction des émissions de polluants acides ? Apparemment oui, car la raréfaction des sul-



3. LES CATIONS BASIQUES (en vert) du sol sont des éléments nutritifs que les plantes absorbent par leurs racines. Habituellement, ces cations s'attachent aux particules d'humus ou d'argiles (à gauche). Cependant, lorsque des pluies acides drainent le sol, les ions hydrogène (en rouge) présents dans l'eau mettent les cations en solution, ce qui permet leur entraînement. Progressivement les ions hydrogène et les ions aluminium (en bleu) libérés dans le sol par les pluies acides peuvent se rassembler en particules (à droite). Non seulement les ions hydrogène et aluminium éloignent les éléments nutritifs essentiels, mais ils perturbent la biochimie des plantes. L'ion aluminium, notamment, est toxique en concentration excessive.

fures atmosphériques s'est accompagnée d'une raréfaction rapide des composés basiques de l'atmosphère ; plus précisément, nous avons calculé que la raréfaction des bases atmosphériques a supprimé 54 à 68 pour cent des effets liés à la réduction des polluants acides en Suède et jusqu'à 100 pour cent dans l'Est de l'Amérique du Nord (voir la figure 2). Ainsi, malgré la limitation des rejets d'acides, l'environnement est resté exposé aux acides, parce que les poussières basiques étaient simultanément moins nombreuses.

Pourquoi cette brusque réduction des émissions de poussières ? La diversité mal connue des sources de poussières empêche de répondre à cette question. Nous savons que l'avènement de techniques industrielles plus propres a fortement contribué à cette réduction des poussières : l'amélioration des brûleurs et des systèmes de dépoussiérage des fumées a fortement réduit les pollutions liées à la combustion des énergies fossiles, par

exemple. La détermination quantitative de l'émission de poussières par les transports, par l'agriculture ou par l'érosion due au vent reste difficile, mais l'ensemble des données conduit à penser que, au total, la diminution des rejets de poussières est principalement liée à des changements de comportements humains.

Une source majeure d'éléments nutritifs

Depuis des années, les agronomes enregistrent une diminution mondiale des concentrations en ions calcium, magnésium et potassium dans les sols forestiers. Ainsi, Leif Hallbäck et Carl Olof Tamm, de l'Université d'Uppsala, ont mesuré la disparition de 56 à 74 pour cent des cations dans les forêts d'épicéas norvégiennes, au cours des 60 dernières années. Des évolutions tout aussi catastrophiques ont été observées en Angleterre, en Allemagne et aux États-Unis. Des travaux récents s'accordent



4. LES TEMPÊTES DE SABLE dans le Sahara dispersent des particules de poussière sur tout le Globe : on retrouve parfois des poussières sahariennes jusque en Amazonie, à des distances supérieures à 5 000 kilomètres.

pour montrer que la brusque raréfaction des cations basiques est une cause importante de la dégénérescence des forêts : Ernst-Detlef Schulze et ses collègues de l'Université de Bayreuth pensent que l'appauvrissement des sols en magnésium contribue au dépérissement des forêts de résineux d'Allemagne, et, dans les Appalaches, les troubles de croissance des séquoias semblent également correspondre à une décalcification du sol. Par ailleurs, des expériences de fertilisation de sols forestiers par des apports de cations basiques ont amélioré l'état de forêts d'érables, au Québec, et de sapins, en France, en Norvège et en Allemagne. Ces expériences confirment que certains sols souffrent non seulement des pluies acides, mais aussi de la pénurie de cations basiques dans l'atmosphère.

Les chimistes savent aujourd'hui déterminer l'origine des cations basiques et suivre leurs déplacements dans les écosystèmes forestiers en mesurant l'abondance des isotopes naturels du strontium (ces isotopes se distinguent par des nombres de neutrons différents). Cet élément est un bon marqueur du calcium, car il se comporte chimiquement comme lui. Or la composition isotopique du strontium est différente, selon que le strontium provient de l'atmosphère ou du sous-sol. Par des dosages des isotopes du strontium, on a établi le rôle prépondérant de la poussière atmosphérique comme source importante d'ions pour les écosystèmes forestiers. En outre, ces dosages ont montré que, dans les régions où les sols ont été dégradés par

les pluies acides ou dans les sols naturellement pauvres en ions basiques, la majeure partie du calcium semble provenir de l'atmosphère plutôt que des roches. Ainsi le hêtre qui domine les forêts non polluées du Chili se nourrit presque exclusivement de calcium atmosphérique.

Ces observations montrent comment l'atmosphère contribue à l'alimentation des forêts et comment l'appauvrissement de l'atmosphère en cations basiques a ralenti la régénération des sols. Bien sûr, les concentrations naturelles en poussières n'ont jamais été constantes, dans l'atmosphère, mais, dans le passé, les variations s'étaient étalées sur des siècles ou sur des millénaires. Analysant des carottes de glace du Groenland, Paul Mayewski et ses collègues de l'Université du New Hampshire ont montré que le contenu en poussières de l'atmosphère a été fortement modifié par les variations climatiques au cours des 20 000 dernières années : lors des périodes arides et froides, les concentrations en ions calcium et en poussières étaient élevées ; lors des périodes humides et chaudes, elles étaient faibles. En outre, les concentrations actuelles sont inférieures à celles des 1 200 dernières années (il y eut toutefois une raréfaction considérable de la concentration en poussières au cours des années 1930, dans la région de l'Ouest des États-Unis).

Encore moins de soufre

En découvrant le rôle fondamental des composés basiques de l'atmosphère et, plus récemment, le lien étroit entre les émissions de poussières atmosphériques et les éléments nutritifs des sols, les agronomes ont mieux compris les réactions des forêts à la pollution. L'ensemble des études montre que les mécanismes d'action des pluies acides sont plus complexes que prévu et que les ravages causés par la pollution sont plus graves qu'on ne l'imaginait. Le gouvernement américain fondait ses récents programmes de lutte contre les pluies acides sur un audit de 1990, qui concluait que ces pluies n'avaient pas d'action prouvée sur les forêts ; cette conclusion n'est aujourd'hui plus tenable.

Le phénomène des pluies acides, ajouté à la raréfaction des éléments basiques, semble placer la plupart des espèces végétales, notamment dans les écosystèmes sensibles, dans des condi-

tions écologiques qu'elles n'ont jamais connues ; aussi la prévision de leur résistance et de leurs comportements au cours des prochaines décennies semble difficile. De surcroît, les effets de la pollution pourraient ne pas se limiter aux plantes : Jaap Graveland et ses collègues de l'Université de Groningue ont observé que, dans les forêts les plus gravement touchées par les pluies acides, où les concentrations en éléments basiques du sol sont les plus faibles, certains oiseaux, telles les mésanges de Hollande, produisent des œufs dont les coquilles sont plus minces et plus fragiles.

Comment résoudre ce problème des pluies acides et des poussières atmosphériques ? Les solutions les plus étonnantes ont été imaginées : après la publication d'un de nos récents articles, par exemple, un lecteur proposa des campagnes de lâchers de ballons qui, une fois en altitude, relargueraient des particules riches en calcium. C'est une solution poétique, mais coûteuse. Nous proposons plutôt de continuer à réduire les émissions de polluants acides à un niveau tel que ces derniers puissent être compensés par les constituants basiques naturels de l'atmosphère : autrement dit, il faudrait réduire les émissions de dioxyde de soufre et de dioxyde d'azote plus encore qu'on ne le fait aujourd'hui.

Lars HEDIN et Gene LIKENS sont respectivement professeurs d'écologie à l'Université Cornell et à l'Université de Millbrook.

Ecology and Decline of Red Spruce in the Eastern United States, sous la direction de C. Eagar et M.B. Adams, Springer-Verlag, 1992.

J. GRAVELAND, R. van der WAL, J.H. van BALEN et A.J. van NOORDWIJK, *Poor Reproduction in Forest Passerines from Decline in Snail Abundance of Acidified Soils*, in *Nature*, vol. 368, pp. 446-448, 31 mars 1994.

Lars O. HEDIN, Lennart GRANAT, Gene E. LIKENS, T. Adri BUSHAND, James N. GALLOWAY, Thomas J. BUTLER et Henning RHODE, *Steep Declines in Atmospheric Base Cations in Regions of Europe and North America*, in *Nature*, vol. 367, pp. 351-354, 27 janvier 1994.

Gene E. LIKENS, Charles T. DRISCOLL et Donald C. BUSO, *Long-Term Effects of Acid Rain : Response and Recovery of a Forest Ecosystem*, in *Science*, vol. 272, pp. 244-246, 12, avril 1996.

Un grillon robot

BARBARA WEBB

Un système électromécanique simple imite le comportement d'une créature vivante.

Le chant du grillon mâle attire puissamment les femelles : lorsqu'il se fait entendre, ces dernières peuvent marcher pendant plusieurs heures en direction de la source sonore, même si elles sont placées sur un tapis roulant qui les en maintient éloignées. Quoi de plus simple que ce comportement automatique ?

Pourtant cette simplicité n'est qu'apparente : un robot équipé de deux roues motrices indépendantes, par

exemple, rejoindra difficilement en ligne droite une source sonore située en face de lui. En effet, nous ne pourrions nous contenter de fournir la même puissance électrique aux deux moteurs, car leurs imperfections mécaniques, et celles de la transmission et des roues imposent un courant d'alimentation légèrement différent pour que les deux roues tournent à la même vitesse ; en outre, la puissance doit être constamment ajustée pour compenser

les forces de friction et d'inertie qui varient au cours du temps. Enfin, même si nous parvenions à faire tourner les roues à la même vitesse, nous devrions équiper le robot d'un dispositif qui compenserait les changements de direction provoqués par les inégalités du sol ou par des dérapages.

Au total, même les algorithmes de contrôle d'un trajet aussi simple qu'une ligne droite semblent complexes. Paradoxalement, un comportement qui semble complexe peut être commandé par un algorithme plus simple : plutôt que de forcer le robot à marcher en ligne droite, on peut le programmer pour atteindre son objectif en contournant les obstacles plutôt qu'en les franchissant.

C'est en suivant ce principe que nous avons construit, avec un matériel et des algorithmes simples, un robot qui imite le comportement complexe de l'insecte réel dans son environnement habituel : ce robot est un modèle réaliste des mécanismes neurobiologiques responsables de ce comportement. Pour simplifier, nous avons restreint les tâches du robot à celle décrite au début de cet



article : l'identification et la recherche par une femelle d'un mâle qui appelle.

La fréquence et le rythme

Comment les grillons femelles reconnaissent-ils le chant d'un mâle de leur espèce? Les grillons mâles produisent un son de fréquence bien déterminée, autour de 4,5 kilohertz, en frottant leurs ailes l'une contre l'autre : les femelles réagissent mieux à cette fréquence qu'aux sons de fréquence inférieure ou supérieure. De surcroît, le rythme du chant est une caractéristique de chaque espèce. Chaque frottement des ailes engendre un son, ou syllabe ; le rythme de répétition des syllabes par un insecte mâle est la caractéristique la plus déterminante pour la réaction d'une femelle de son espèce.

Dans de nombreuses espèces, enfin, le chant est structuré en motifs de trois à cinq syllabes, séparés par des périodes de silence. Toutefois, la plupart des femelles répondent à des syllabes répétées en continu et séparées par un intervalle de temps invariable.

Une femelle ne peut se contenter de reconnaître le chant des mâles de son espèce : quand plusieurs mâles chantent simultanément autour d'elle, elle doit en distinguer un seul et ne se diriger que vers lui. En laboratoire, les femelles semblent préférer les chants les plus sonores : confrontée à deux chants ayant tous deux le rythme approprié, une femelle se dirige vers le plus intense, qui lui signale le mâle le plus gros, ou simplement le plus proche.

Après avoir choisi un chant, le grillon femelle doit en atteindre la

source. Nous savons qu'une femelle a reconnu ou choisi un chant lorsque nous la voyons se déplacer vers celui-ci. Le comportement du grillon est donc reproductible avec un dispositif de localisation des sons qui ne réagit que pour certains types de son.

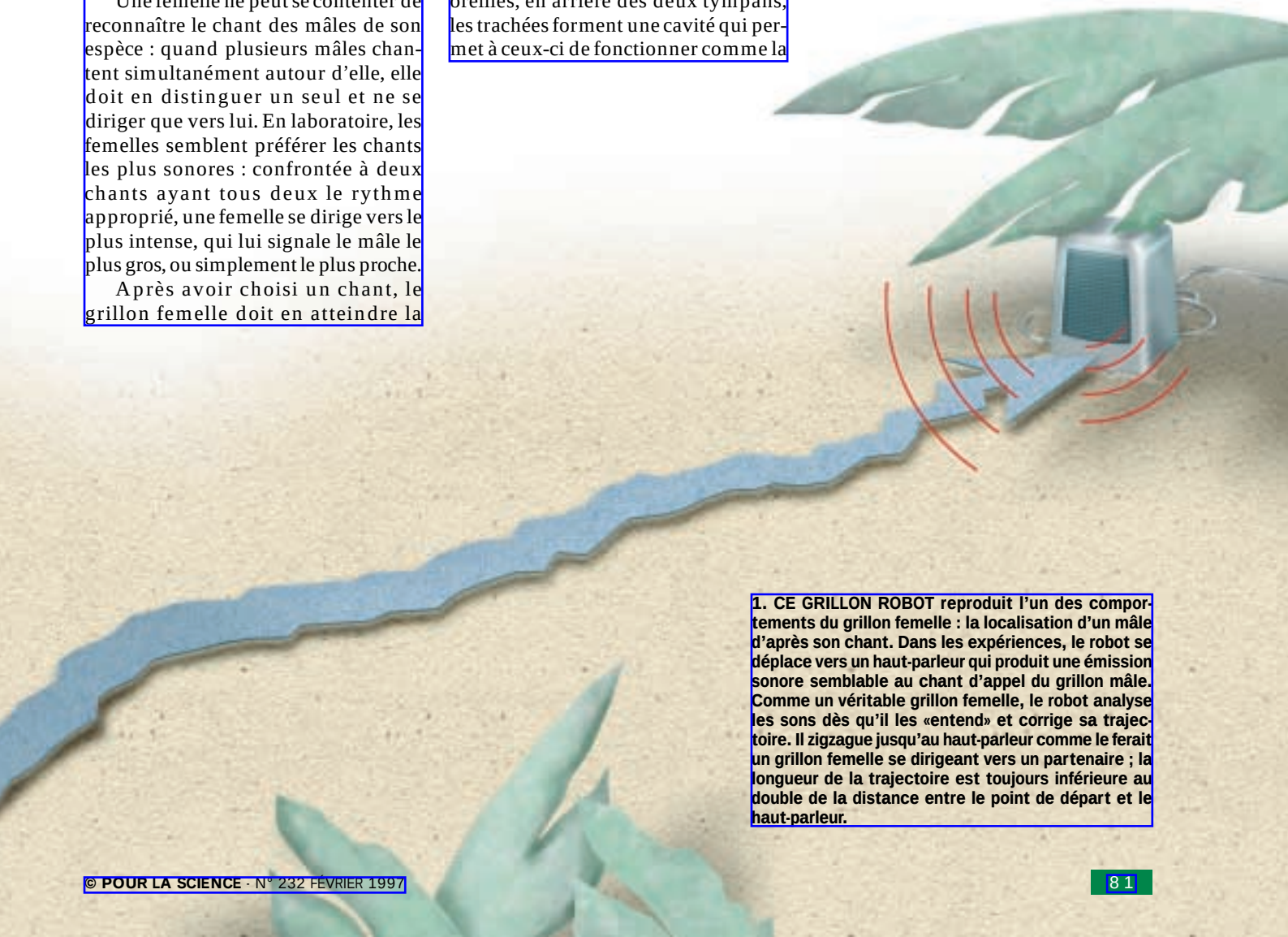
Comment le grillon entend-il? Ses oreilles sont placées sur ses pattes antérieures. Comme le corps du grillon absorbe peu les sons de basse fréquence, les deux oreilles reçoivent un son de même intensité, quelle que soit la direction d'où il provient. D'autre part, comme la longueur d'onde du chant est beaucoup plus grande que la distance entre les deux pattes, le décalage temporel dans l'arrivée du son est trop faible pour que les neurones auditifs du grillon le détectent.

En revanche, le son parvient à chacun des tympans par deux chemins différents : directement, par l'oreille, et, indirectement, à travers le réseau de tubes respiratoires (trachées) ouverts sur l'extérieur par deux rangées symétriques d'orifices, de chaque côté du corps (voir la figure 2). Au niveau des oreilles, en arrière des deux tympans, les trachées forment une cavité qui permet à ceux-ci de fonctionner comme la

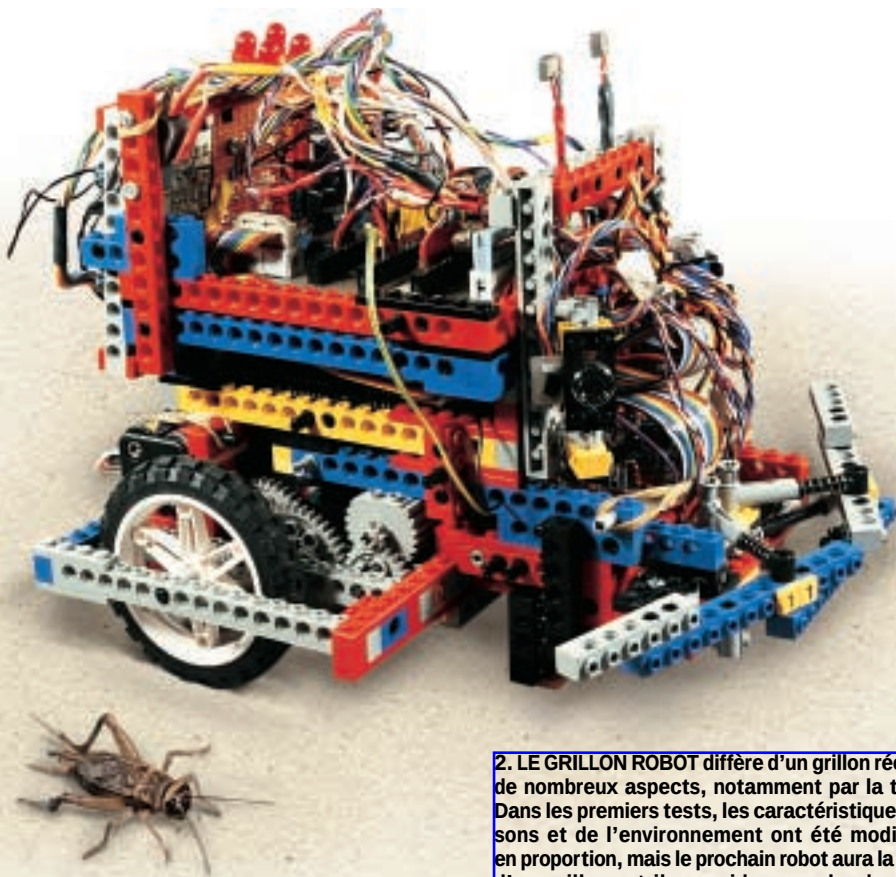
peau d'un tambour. Les deux ondes qui parviennent sur un tympan en suivant ces deux chemins parcourent des distances différentes : elles sont déphasées. Leurs interférences renforcent ou suppriment la vibration du tympan : l'amplitude de celle-ci est supérieure du côté le plus proche du son, ce qui indique à l'animal la direction d'où provient le son.

Enfin le réseau respiratoire qui relie les oreilles du grillon aux orifices trachéens est construit de telle sorte qu'il crée des déphasages adaptés aux caractéristiques du chant de l'espèce : le dispositif ne détecte pas de façon fiable la direction des sons d'autres fréquences. Le système auditif du grillon ignore donc, par construction, les mauvaises fréquences, dont il ne détermine pas la direction de la source.

Comment reproduire ces mécanismes afin de vérifier les hypothèses physiologiques? Nous avons construit en pièces de Lego un petit véhicule de forme cubique, d'environ 20 centimètres de côté. Il a deux roues motrices



1. CE GRILLON ROBOT reproduit l'un des comportements du grillon femelle : la localisation d'un mâle d'après son chant. Dans les expériences, le robot se déplace vers un haut-parleur qui produit une émission sonore semblable au chant d'appel du grillon mâle. Comme un véritable grillon femelle, le robot analyse les sons dès qu'il les «entend» et corrige sa trajectoire. Il zigzague jusqu'au haut-parleur comme le ferait un grillon femelle se dirigeant vers un partenaire ; la longueur de la trajectoire est toujours inférieure au double de la distance entre le point de départ et le haut-parleur.



2. LE GRILLON ROBOT diffère d'un grillon réel par de nombreux aspects, notamment par la taille. Dans les premiers tests, les caractéristiques des sons et de l'environnement ont été modifiées en proportion, mais le prochain robot aura la taille d'un grillon, et il se guidera sur le chant de l'animal.

latérales et une roue directrice à l'avant. Comme il est beaucoup plus grand qu'un grillon, ses oreilles (de petits microphones) sont plus écartées. Nous avons donc ramené la fréquence du chant à deux kilohertz. Un circuit électronique traite les sons comme le système auditif d'un grillon : il produit, toutes les 30 millisecondes, un signal qui correspond à la vibration du tympan. Ce signal a une amplitude supérieure du côté de la source sonore, pour les sons de la bonne fréquence. En pratique, toutefois, les oreilles du robot n'indiquent la bonne direction que dans 90 pour cent des cas, en raison des bruits parasites dans les haut-parleurs, dans la pièce et dans les moteurs du robot.

Deux neurones cruciaux

Comment utiliser, maintenant, la différence d'amplitude de vibration des tympanes afin de diriger le robot ? Pour chaque oreille du grillon, environ 50 neurones sensoriels convergent vers un petit nombre de neurones intermédiaires, dans le système nerveux central de l'insecte. Deux de ces neurones intermédiaires, l'un relié à l'oreille

gauche, l'autre à l'oreille droite, forment une paire qui semble cruciale pour l'orientation vers les sources sonores : en mesurant et en manipulant l'excitation de cette paire de neurones pendant que l'animal marche vers une source, des neurophysiologistes ont établi que l'animal tourne toujours du côté du neurone intermédiaire le plus excité.

Quand une syllabe parvient à une oreille, les influx produits par les neurones sensoriels de cette oreille s'accumulent dans le neurone intermédiaire correspondant. Quand un certain seuil est atteint, le neurone intermédiaire décharge (à son tour, il émet des influx nerveux) plusieurs fois au cours d'une même syllabe. Le délai entre la réception du son et la première décharge, ainsi que le nombre de décharges pendant une syllabe, dépendent de l'intensité des influx reçus par le neurone (elle-même proportionnelle à l'amplitude de vibration du tympan). Ces deux paramètres de l'activité des neurones codent donc la vibration des tympanes. À la fin d'une syllabe, le neurone revient progressivement au repos. Si un autre son est capté pendant ce temps de relaxation, le neurone, encore proche

de son seuil de décharge, recommence plus rapidement à décharger.

Les femelles ont ainsi deux moyens de se diriger vers le son : à chaque syllabe, soit elles se tournent du côté où la décharge a commencé en premier, soit elles se tournent du côté où le nombre de décharges est supérieur (le résultat est identique dans les deux cas). Dans la première hypothèse, la réaction ne se produit qu'au début d'une syllabe. C'est effectivement le cas, car la répétition des syllabes est bien le facteur qui détermine principalement la réaction des femelles. Quand le son est continu ou se répète plus rapidement que le temps de relaxation des neurones, ceux-ci déchargent en permanence, et la détermination du côté dont le neurone intermédiaire a commencé à décharger en premier devient impossible. En revanche, quand les syllabes sont répétées trop lentement, l'information sur la direction où tourner arrive moins fréquemment, de sorte que la femelle ne parvient pas à se diriger vers le mâle. Le rythme idéal de répétition est situé entre ces deux extrêmes.

L'autre mécanisme possible, l'orientation sur la plus grande fréquence de décharge, indique la direction du son quel que soit le rythme de répétition des syllabes. Il faudrait alors admettre que les grillons possèdent d'autres processus neuronaux pour distinguer les chants ayant le rythme approprié. Ce mécanisme a toutefois la faveur des neurophysiologistes, car on a identifié des neurones du cerveau du grillon qui exerceraient ce contrôle.

Le plus simple

Avec notre robot, nous avons choisi de tester le premier mécanisme, car c'est le plus simple : nous avons équipé le robot d'un système sensoriel qui ne fonctionne que pour un chant de fréquence et de rythme donnés, sans traitement supplémentaire du signal. Le «cerveau» du robot est un microprocesseur qui envoie des commandes de marche et d'arrêt aux moteurs latéraux et qui reçoit des signaux de plusieurs capteurs : outre les microphones et le circuit qui simule le retard et l'annulation de phase dans le système auditif du grillon, le robot est équipé de capteurs infrarouges et de capteurs de choc qui détectent les obstacles. Au total, le programme du robot ne contient qu'une centaine d'instructions.

Ce programme additionne les signaux de sortie du circuit auditif. Lorsqu'un côté atteint le premier un seuil prédéterminé, la roue de ce côté est brièvement stoppée : le robot tourne. Quand le son persiste, la somme reste supérieure au seuil et ne déclenche aucune réaction supplémentaire : le robot poursuit son chemin dans sa nouvelle direction. Lorsque le son s'arrête, la somme s'annule progressivement, simulant la période de récupération du neurone du grillon. Ainsi, seul un son discontinu et répétitif provoque une réponse assez fréquente pour que le robot se dirige en direction du son.

Comme le robot traite les sons plus lentement qu'un grillon, nous lui avons fait entendre un chant dont le rythme, à 300 millisecondes par syllabe, est inférieur d'un facteur dix environ au rythme naturel. Toutefois le robot tourne et avance aussi vite qu'un vrai grillon : sa tâche est plus difficile. Nous supposons que, si le robot ainsi construit trouvait la source d'un son, les mêmes mécanismes pourraient contrôler le comportement d'orientation chez les grillons.

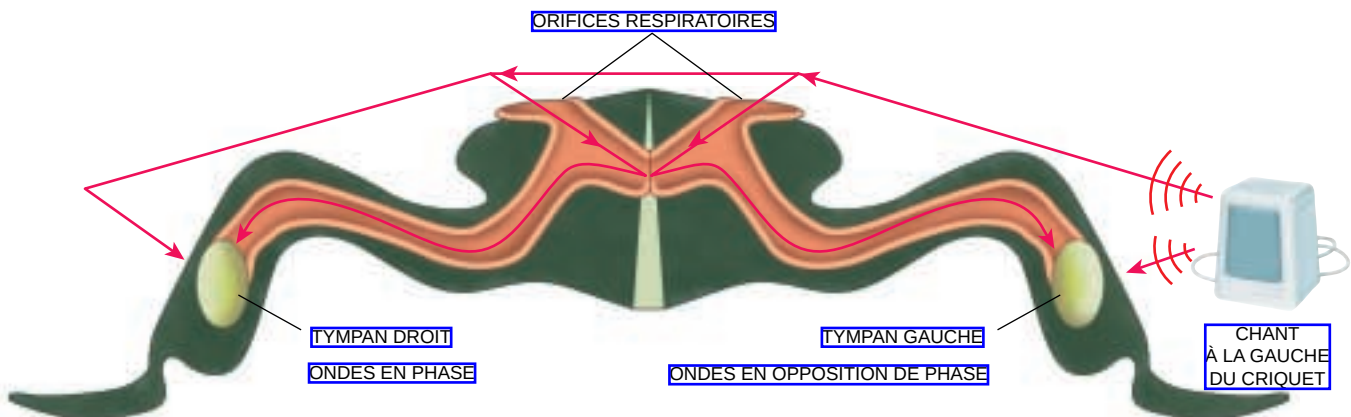
Lors des tests, nous plaçons le robot dans une enceinte avec un haut-parleur et nous enregistrons son trajet en direction de ce dernier. Quand un son

à la fréquence de deux kilohertz est rythmé en syllabes de 300 millisecondes, séparées de silences de même durée, le robot zigzague dans sa direction selon un chemin sinueux, semblable à ceux que décrivent de vrais grillons. La longueur de ce chemin est toujours inférieure au double de la distance entre le point de départ et le haut-parleur. Quand des obstacles sont placés entre le point de départ et la source du son, le robot les contourne.

Quand le rythme des syllabes est plus rapide (syllabes et silences de moins de 200 millisecondes), le programme du robot ne distingue plus les



Léon - Laune Grace Photographie Del - Scott Bruce Coleman Inc



3. LE GRILLON CAPTE LES SONS par les oreilles situées sur les deux pattes antérieures. Les sons atteignent les tympanes par deux voies distinctes : directement par les oreilles et à travers le réseau tubulaire du système respiratoire, qui s'ouvre sur le corps de l'insecte et communique avec les oreilles. Sur le tympan le plus proche

de la source sonore, le son qui arrive par voie externe parcourt une distance plus courte que le son qui arrive par voie interne. Cette différence déphase les deux ondes sonores, qui s'additionnent et amplifient la vibration du tympan : le chant apparaît plus fort de ce côté.

silences. Il envoie alors peu de signaux de changement de direction aux moteurs : le robot parcourt des lignes droites autour de l'arène et ne trouve le haut-parleur que par hasard.

Des échecs bien imités

Quand le rythme des syllabes est plus lent (syllabes et silences de plus de 500 millisecondes), le robot trouve rarement le haut-parleur : les changements de direction sont plus rares, et le robot finit par suivre un chemin incurvé dans la direction générale du haut-parleur. De même, les vrais grillons prennent souvent un chemin courbe pour des

rythmes plus lents, et ils échouent davantage pour les rythmes plus rapides : non seulement le robot réussit comme les grillons, mais il échoue aussi comme eux.

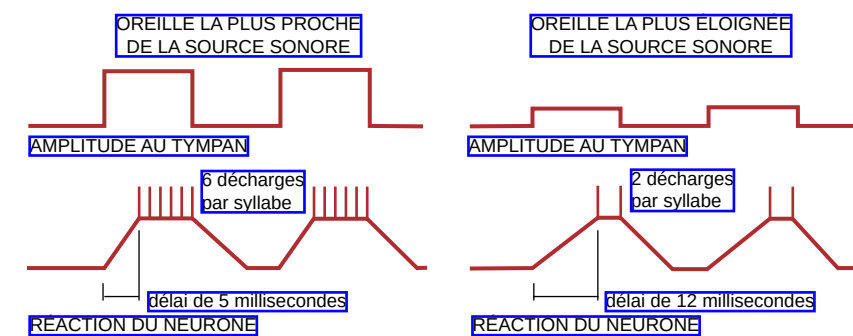
Dans la nature, le chant des grillons mâles est un motif, formé de trois à cinq syllabes séparées par des périodes de silence. Lorsque l'on fait entendre un tel chant au robot, le résultat est mitigé. Le robot se déplace sur une assez longue distance pendant les silences entre les motifs : il dépasse parfois le haut-parleur et met du temps à se réorienter. Toutefois, quand il parvient au haut-parleur, c'est plus rapidement qu'avec un chant monotone de syllabes

régulièrement espacées : il évalue la bonne direction pendant les motifs, puis il se déplace rapidement vers le haut-parleur pendant les périodes de silence sans perdre de temps en corrections supplémentaires.

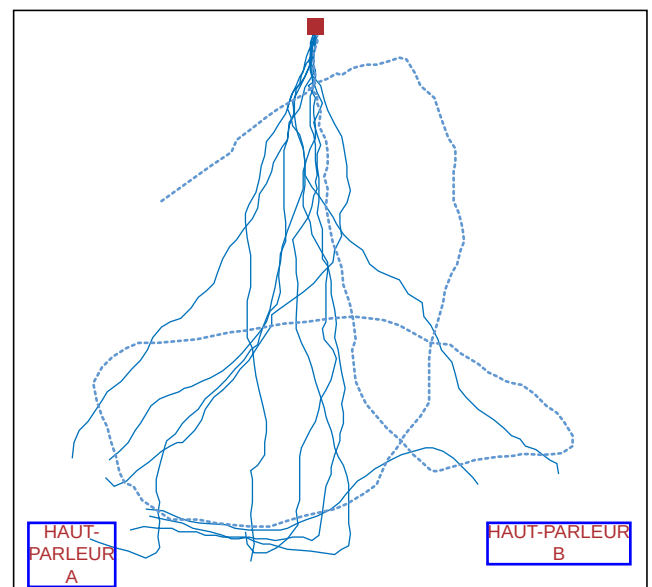
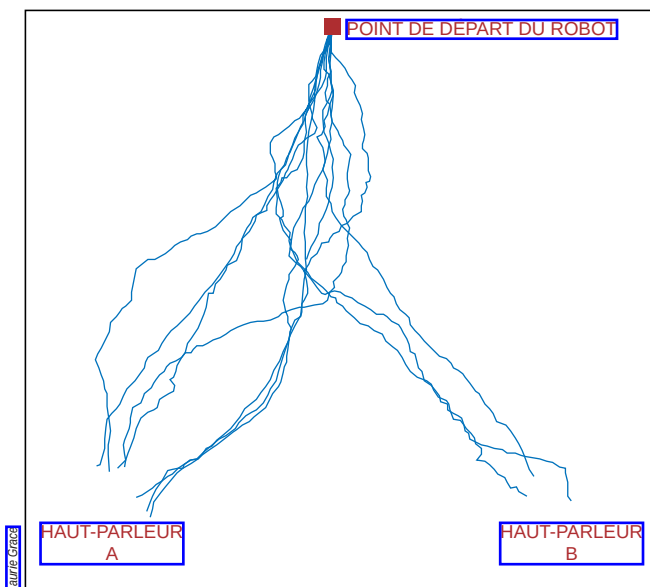
Pour les grillons aussi, le trajet est plus direct quand le chant est composé de motifs, mais un grillon que l'on empêche d'avancer tourne plus vers la direction du son lorsque les syllabes s'enchaînent sans interruption. Le comportement du robot laisse penser que la structure en motifs du chant est plus efficace pour attirer une femelle en raison de la structure de l'environnement, parsemé d'obstacles, plutôt que de mécanismes supplémentaires de traitement neuronal.

Comment le robot réagit-il quand il capte le son de plusieurs sources sonores ? Lorsque deux haut-parleurs émettent chacun un chant, le robot semble n'avoir aucun problème pour «faire son choix» et se dirige presque directement vers l'un ou vers l'autre.

Le programme du robot ne distingue naturellement pas entre les deux sons, mais les tests montrent que l'interaction des mécanismes simples du robot avec un champ sonore particulier produit un comportement proche de celui d'un véritable grillon. Autrement dit, il n'est pas nécessaire d'imaginer un processus complexe pour expliquer comment la femelle grillon sélectionne un partenaire. Malheu-



4. LA REACTION D'UN NEURONE INTERMEDIAIRE auditif dépend de la direction de la source sonore. L'amplitude de la vibration du tympan (*en haut*) le plus proche de cette source (*à gauche*) est la plus grande. Chaque signal est la réaction à un son, nommé syllabe, émis par le grillon mâle. Le neurone intermédiaire relié au tympan le plus proche du son réagit à la vibration d'amplitude la plus grande par une augmentation rapide de la différence de potentiel électrique entre l'intérieur et l'extérieur du neurone ; celle-ci présente en outre six pics (*en bas, à gauche*). Pour le neurone relié au tympan le plus éloigné, la différence de potentiel augmente plus lentement et les pics sont moins nombreux (*en bas, à droite*).



5. LES TRAJETS DU ROBOT vers la source sonore sont quasi indiscernables de ceux suivis par un grillon. Quand des chants sont émis simultanément par les deux haut-parleurs, le robot se dirige simplement vers l'un ou vers l'autre (*à gauche*). De même, les grillons femelles se dirigent vers un seul mâle quand plusieurs chantent

simultanément. Quand les syllabes proviennent alternativement de chaque haut-parleur, les trajets du robot deviennent erratiques, le véhicule tournant souvent en rond entre les haut-parleurs (*à droite*). Dans une telle situation, les femelles réelles ont un comportement similaire.

reusement, dans ces expériences, nous ne contrôlons pas assez les caractéristiques des sons pour tester si le robot préfère certains chants à d'autres.

Lorsque le chant est partagé entre les deux haut-parleurs, en revanche, les syllabes provenant alternativement d'un côté puis de l'autre, le robot s'embrouille et se déplace entre les deux sources. Un grillon femelle confronté à ce scénario fait plus ou moins de même. Dans la nature, une telle situation ne dure pas : si deux mâles commencent à chanter en alternance, ils se synchronisent rapidement, parce que le chant de l'un stimule celui de l'autre.

Les similitudes entre les comportements du robot dans diverses situations et celui de véritables grillons ne prouvent pas que les mécanismes qui contrôlent la recherche du son chez ces derniers soient ceux que nous avons choisis pour nos expériences. Toutefois, elles permettent de proposer un modèle simple. Plus généralement, elles montrent qu'un comportement efficace et complexe peut résulter d'un mécanisme de contrôle simple, dès lors que celui-ci interagit de façon adéquate avec son environnement. Nous construisons aujourd'hui, avec le même mécanisme, un robot plus petit qui traite les sons plus rapidement ; nous le testerons avec des enregistrements de véritables chants de grillons pour voir si son comportement est encore plus proche de celui des grillons femelles.

Barbara WEBB est professeur de psychologie à l'Université de Nottingham.

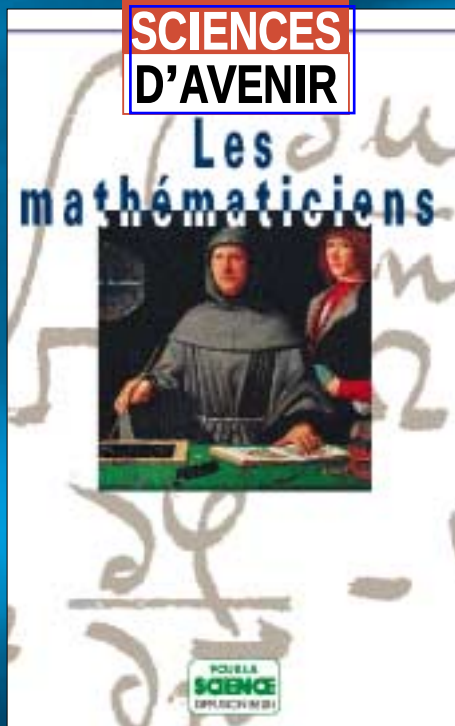
Franz HUBER et John THORSON, *La communication auditive chez le grillon*, in *Pour la Science*, février 1986.

T. WEBER et J. THORSON, *Auditory Behavior of the Cricket*, vol. 4 : *Interaction of Direction of Tracking with Perceived Temporal Pattern in Split-Song Paradigms*, in *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 163, n° 1, pp. 13-22, janvier 1988.

Cricket Behavior and Neurobiology, sous la direction de F. Hubert, T.E. Moore et W. Loher, Comstock Publishing Associates, 1989.

A. MICHELSEN, A.V. POPOV et B. LEWIS, *Physics of Directional Hearing in the Cricket Gryllus bimaculatus*, in *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 175, n° 2, pp. 153-162, février 1994.

Barbara WEBB, *Using Robots to Model Animals : A Cricket Test*, in *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 16, n° 2-4, pp. 117-132, 1995.



LES MATHÉMATICIENS

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

Voir bon de commande p. 98

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN

La vie quotidienne dans l'Égypte ancienne

ANDREA MCDOWELL

Des ouvriers-artisans et leurs familles ont vécu, il y a 3 000 ans, dans le village nommé aujourd'hui Deir el-Medina. Des écrits provenant de cette communauté exceptionnellement instruite décrivent de nombreuses activités quotidiennes.

Durant le Nouvel Empire (1552-1085 avant notre ère), la ville de Thèbes, capitale de Haute-Égypte, devint l'un des plus grands centres urbains du monde antique. Les temples imposants de Karnak et de Louxor furent construits à cette époque ; ils dominent encore la rive droite du Nil dans la ville moderne de Louxor. La Vallée des Rois, toute

proche sur la rive gauche du Nil, contient une soixantaine de tombeaux, dont celui du pharaon Toutankhamon. Des centaines de tombes privées, parfois magnifiquement décorées, s'alignent également sur cette rive.

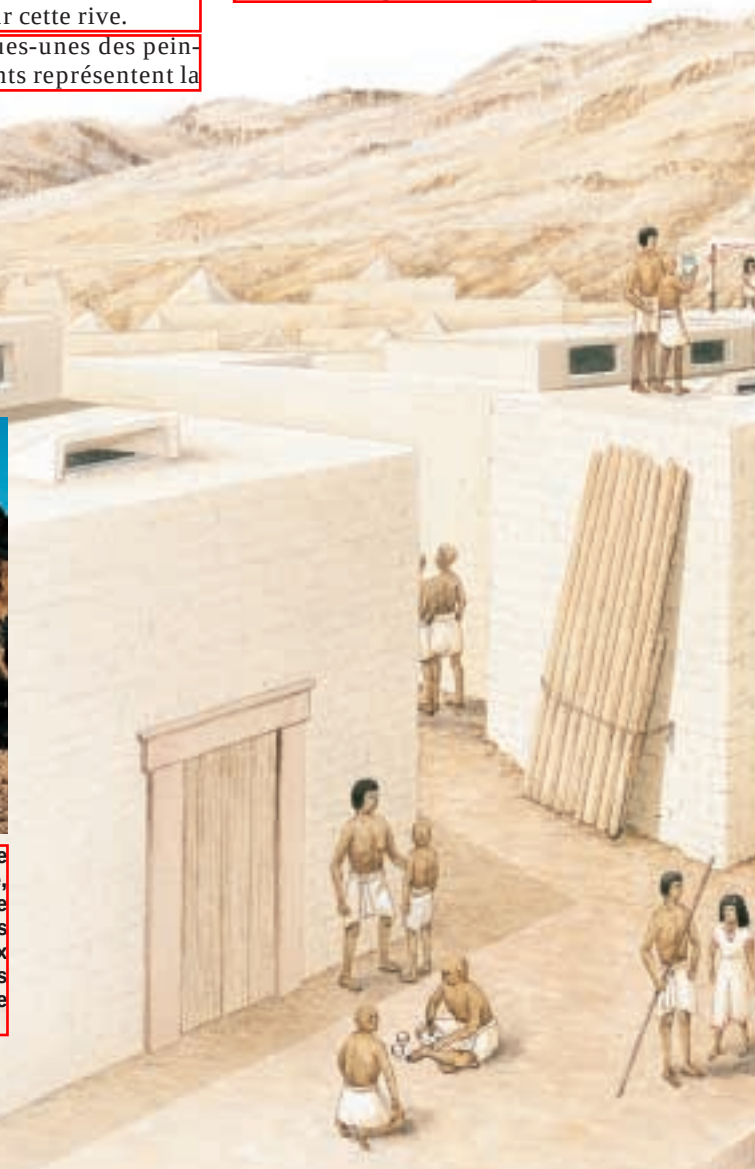
Bien que quelques-unes des peintures des monuments représentent la

vie fastueuse de la haute société, le reste des temples et des tombeaux nous renseigne davantage sur les préoccupations religieuses et les croyances en l'au-delà que sur les aspects de la

Photo : © Musée National, Paris. Dessin : Tony Masek, 1978.



1. DEIR EL-MEDINA (ci-dessus) est situé près des ruines de la ville de Thèbes. Il y a 3 000 ans, ce village était celui des tailleurs de pierre, des scribes et des peintres-décorateurs qui travaillaient à la nécropole de la Vallée des Rois. Ces ouvriers-artisans utilisaient des fragments de pierre nommés «ostraca» comme supports d'écriture peu coûteux pour les documents officiels ou privés, les lettres, les poèmes et les croquis. Des milliers d'ostraca ont été trouvés sur le site de ce village remarquablement préservé, reconstitué ci-contre.



vie quotidienne. Si moins de vestiges témoignent de cette dernière, c'est que la majorité des demeures, contrairement aux monuments de pierre parvenus jusqu'à nous, étaient bâties en briques de terre séchées au soleil qui n'ont pas résisté à l'humidité de la vallée. L'ameublement et toutes traces écrites qui nous auraient documentés sur les modes de vie des quelques lettrés ont également disparu. Toutefois, à la lisière occidentale de l'ancienne cité, les vestiges d'une petite communauté ont échappé à la destruction générale. Dans ce village, aujourd'hui Deir el-Medina, vivaient des ouvriers-artisans qui taillaient et ornaient les tombes royales de la Vallée des Rois.

Situé dans une région aride et relativement isolée, le site est remarquablement préservé : en certains endroits, les restes des habitations et des chapelles atteignent encore une hauteur de deux mètres. Pendant la première moitié de ce siècle, les archéologues

ont surtout trouvé une très grande quantité de monuments religieux et de biens domestiques, ainsi que des tombes intactes contenant des cercueils, des meubles et des vêtements. En outre, ils ont découvert, sur toute la surface du site et, plus particulièrement, dans les décharges de la ville, des milliers de documents écrits qui datent pour la plupart de la période située entre 1275 et 1085 avant notre ère. Quelques-uns de ces textes sont sur des rouleaux de papyrus, mais la plupart sont écrits sur des tessons de poterie ou des éclats de calcaire : les «ostraca», qui, pour cette communauté, servaient de «papier».

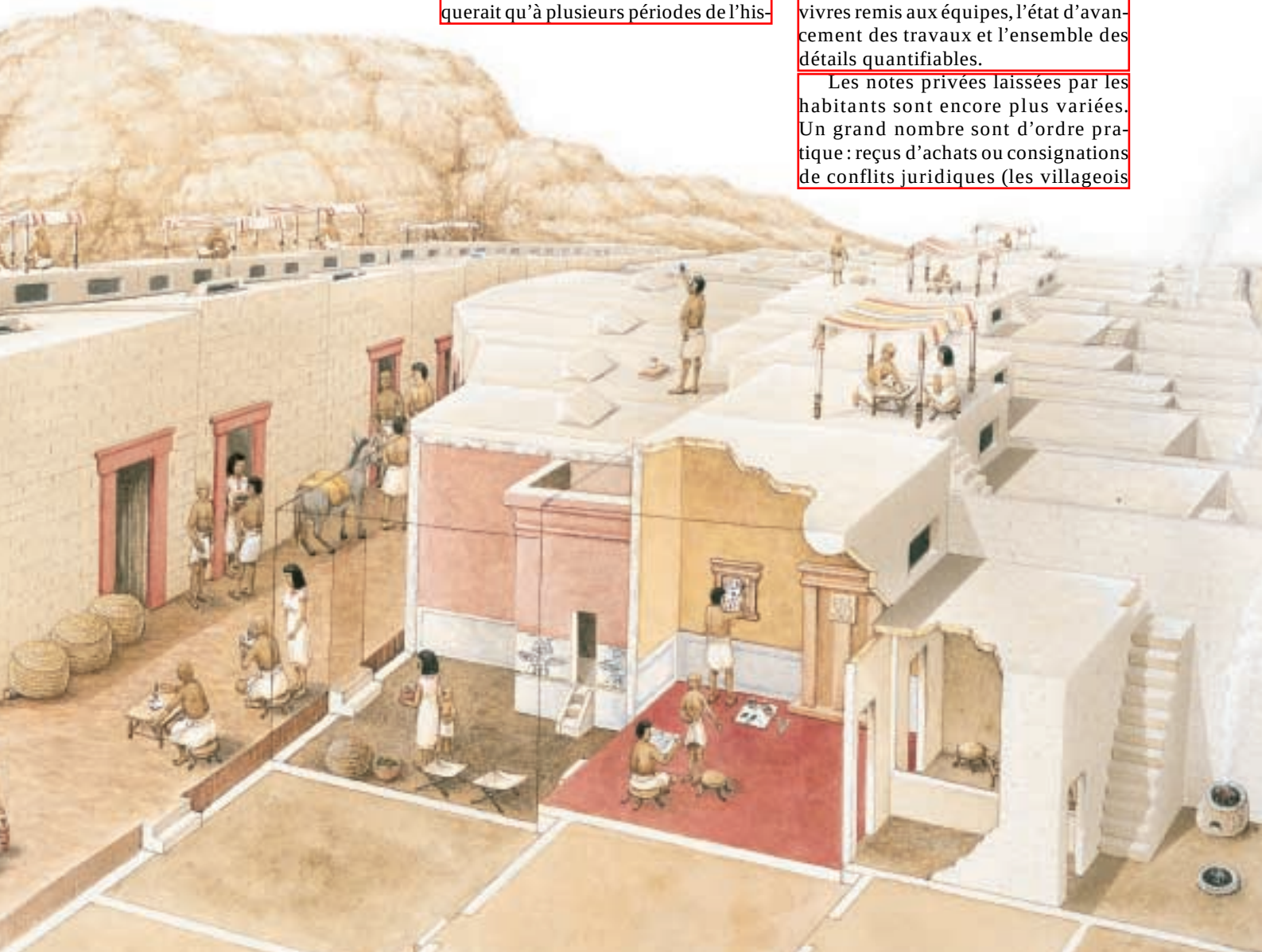
Tous ces écrits révèlent la vie quotidienne d'il y a trois millénaires : on y trouve aussi bien des documents administratifs que des poèmes d'amour ou des correspondances privées qui mentionnent des différends familiaux, des problèmes de santé ou des conflits juridiques. Ces écrits nous renseignent aussi sur le système éducatif de l'Égypte ancienne. L'abondance des textes indiquerait qu'à plusieurs périodes de l'his-

toire de la ville de nombreux hommes savaient lire et écrire (on ignore si beaucoup de femmes, à Deir el-Medina, étaient instruites ; on sait qu'elles échangeaient des lettres, mais peut-être en dictaient-elles le contenu à des hommes). Ce niveau d'instruction élevé était exceptionnel en Égypte ancienne, où une très faible proportion de la population était alphabétisée sous le Nouvel Empire. Les ostraca révèlent comment s'est instaurée cette particularité.

Apporte-moi un peu de miel pour les yeux

Avant d'examiner le système éducatif de Deir el-Medina, utilisons quelques-uns des ostraca afin de reconstituer la vie du village et le contexte dans lequel s'est installé ce système d'instruction exceptionnel. Le grand nombre de documents administratifs l'attestent : les Égyptiens étaient des bureaucrates maniaques, notant avec le plus grand soin les outils qui étaient confiés aux ouvriers travaillant à la nécropole, les vivres remis aux équipes, l'état d'avancement des travaux et l'ensemble des détails quantifiables.

Les notes privées laissées par les habitants sont encore plus variées. Un grand nombre sont d'ordre pratique : reçus d'achats ou consignations de conflits juridiques (les villageois



étaient des plaideurs acharnés). Textes étonnants, les lettres personnelles plongent le lecteur dans ce monde antique du Nouvel Empire. Par exemple, dans l'une de ces missives, un homme nommé Pay écrit à son fils au sujet d'une affection oculaire qu'il a vraisemblablement contractée lors de la construction des tombes, en pleine poussière, sous un mauvais éclairage, avec des éclats de pierre qui volaient :

«Le décorateur Pay dit à son fils le décorateur Preemhab : ne te détourne pas de moi, je ne vais pas bien. Ne cesse pas de plaindre mon sort, car je suis dans l'obscurité depuis que mon dieu Amon m'a abandonné.

«Peux-tu m'apporter un peu de miel pour les yeux, et aussi un peu d'ocre qui sert à faire des briques, et aussi de la poudre de

galène véritable pour les yeux? Dépêche-toi! Je compte sur toi! Ne suis-je pas ton père? Me voilà maintenant bien malheureux. Je suis à la recherche de ma vue, et je ne la trouve pas.»

Les lamentations de Pay ne sont pas étonnantes : la cécité était l'un des pires maux pour un ouvrier qui peignait des personnages et des hiéroglyphes dans les tombes. Le mélange de miel, d'ocre et de galène pour les yeux que Pay réclame est décrit dans des papyrus médicaux ; il s'agissait apparemment d'un remède courant. Le miel a des propriétés antiseptiques et l'ocre, ingrédient utilisé dans beaucoup d'autres prescriptions de l'époque, était censé réduire les enflures parce qu'il rafraîchit les paupières. Comme beaucoup d'ouvriers souffraient de ces affections des yeux, le traitement en question devait être bien connu ; Pay a pu le demander de lui-même ou après avoir consulté un médecin.

La moitié des textes trouvés à Deir el-Medina sont religieux ou littéraires. Des copies d'un grand nombre d'œuvres «classiques» de la littérature égyptienne ancienne y ont été trouvées ; parfois, les ostraca retrouvés dans ce village constituent les seuls exemplaires des œuvres. L'étude de ces textes classiques faisait partie du programme éducatif de base d'un étudiant : des



Musée égyptien de Turin
Ministère de la Culture et de l'Environnement

2. LES SCRIBES utilisaient des brosses de plusieurs tailles, un pot de pigment rouge et des matériaux bruts pour peindre les personnages et les hiéroglyphes dans les tombes royales.



Musée Fitzwilliam, Université de Cambridge

3. CES PORTRAITS d'un tailleur de pierre (à gauche) et d'un scribe (à droite) révèlent deux styles de dessins retrouvés sur les ostraca de Deir el-Medina. Le tailleur de pierre, avec son ciseau et son maillet, est dessiné sommairement ; son nez bulbeux, son menton mal rasé et sa bouche ouverte, lui confère un aspect presque caricatural. L'autre portrait du scribe Amenhotep adorant le dieu Thot est, lui, conforme aux canons de l'art égyptien antique.



Musée égyptien du Caire

dizaines de textes scolaires comportent des extraits d'œuvres majeures de la littérature du Moyen Empire (environ 2000-1640 avant notre ère), écrits dans une langue aussi éloignée du langage ordinaire des étudiants que le français de Rabelais l'est du français d'aujourd'hui. De surcroît, beaucoup de villageois écrivaient eux-mêmes des textes destinés à l'enseignement, des hymnes et des lettres. Le scribe Amennakhte écrivit, par exemple, un poème à la gloire de la ville de Thèbes :

«Au fond de leur cœur, chaque jour, que se disent ceux qui sont loin de Thèbes ?
Ils passent la journée à rêver de son nom, disant «Si seulement sa lumière était la nôtre!»...
Le pain qu'on y trouve a plus de saveur que les gâteaux à la graisse d'oie.
Son eau est plus douce que le miel ; on peut en boire jusqu'à l'ivresse.
Voyez, c'est ainsi qu'on vit à Thèbes !
Pour elle, le ciel a redoublé sa brise rafraîchissante.»

De l'importance de l'instruction

Un papyrus trouvé dans les archives d'un scribe du village montre que les villageois prisait les connaissances et les aptitudes littéraires. Dans cet extrait, l'auteur rend un hommage inhabituel à l'apprentissage : là où d'autres mettent en valeur l'art de l'écriture et la connaissance des œuvres classiques, sa description de la profession de scribe souligne plutôt la notion d'auteur, de créateur de textes, et la renommée qui peut en découler après la mort ; il en appelle à la profonde aspiration de l'Égyptien à l'immortalité :

«Quant aux scribes érudits de l'époque qui succéda à celle des dieux, ceux qui ont prédit les événements à venir, leurs noms vivent à jamais, alors même qu'ils ne sont plus, que leur vie est achevée et que leurs proches sont oubliés.

«Ils ne se sont pas bâti de pyramides de bronze avec des stèles d'airain, ils n'ont point projeté de laisser derrière eux, pour héritiers, des enfants de leur chair qui perpétueraient leur nom. Ils se sont fait pour héritiers les enseignements qu'ils ont écrits.»

L'alphabétisation exceptionnelle des ouvriers de Deir el-Medina est certainement due aux particularités de leur métier : la plupart des artisans qualifiés devaient comprendre les hiéroglyphes pour travailler dans les tombes royales. Aux débuts de l'histoire du village, les tombes des pharaons ne contenaient que de simples instructions pour l'au-delà, écrites en cursive et accompagnées de hiéroglyphes dessinés. Cependant, à la fin du XIV^e siècle avant notre ère, quand des peintures plus élaborées et des sculptures apparurent dans les tombes, le nombre de textes écrits s'accrut, ce qui pourrait s'interpréter comme une élévation du niveau d'instruction.

Le roi Horemheb, qui gouverna vers 1323 avant notre ère, introduisit les reliefs peints dans la Vallée des Rois. Les projets ambitieux d'Horemheb et de ses successeurs néces-

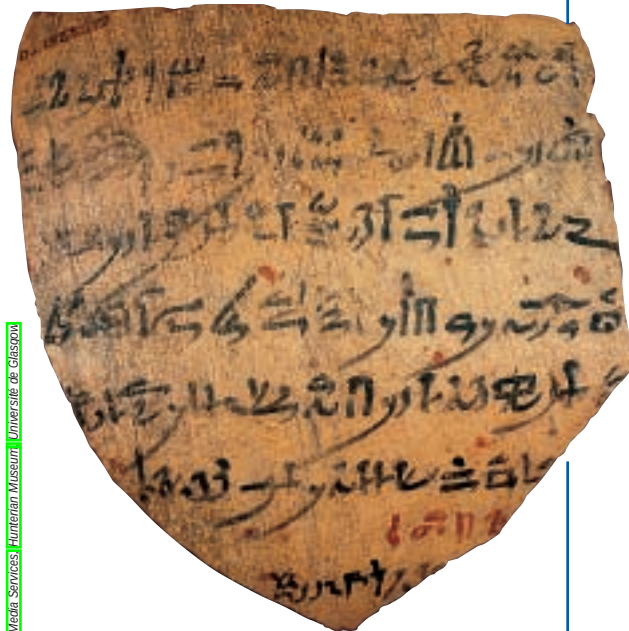
sitaient la présence de toute une équipe de dessinateurs pour faire les dessins initiaux et réaliser la peinture finale ; comme les œuvres peintes des tombes comportaient de nombreux hiéroglyphes, ces ouvriers devaient savoir lire.

Dans l'Égypte ancienne, les personnes éduquées accédaient à un statut social supérieur. Cette éducation distinguait la classe des ouvriers-artisans de celle des paysans. Ces connaissances pouvaient aussi permettre aux ouvriers-artisans de se recycler. En outre, cette ambiance intellectuelle peut aussi avoir stimulé efficacement les jeunes gens, les poussant à étudier pour être au niveau général.

Nous savons encore mal comment les habitants apprenaient réellement à lire et à écrire. Les textes égyptiens du Nouvel Empire ne mentionnent pas directement des écoles, attestant simplement leur existence et leur

Un cours de littérature égyptienne

Cet ostrakon comporte un extrait du poème *Satire des métiers*, une œuvre classique du Moyen Empire. Ce poème décrit des activités variées, telles celles de tisserand, de fabricant de flèches et de messager, que l'auteur considère comme inférieures à celle de scribe, tout à fait digne d'estime. L'étudiant qui en a fait cette copie n'était apparemment pas familier du langage archaïque utilisé dans le poème – écrit plus de 700 ans auparavant – et a dénaturé le texte d'origine. Lorsque le cours était terminé, l'étudiant inscrivait la date à l'encre rouge.



Texte original de l'extrait :

Le messager pénètre dans le désert,
Laissant ses biens à ses enfants ;
Il redoute les lions et les Asiatiques,
Et ne se connaît lui-même que lorsqu'il est en Égypte.
Lorsque, à la nuit il retrouve sa demeure,
La marche l'a épuisé ;
Que sa maison soit de toile ou de briques,
Son retour est sans joie.

Sa copie par l'étudiant :

Le messager pénètre dans le désert,
Laissant ses biens à ses enfants ;
Il redoute les lions et les Asiatiques,
Qu'en est-il lorsqu'il est en Égypte ?
Lorsque, désespéré, il retrouve sa demeure,
Le trajet l'a partagé.
Tandis qu'il s'avance hors de sa maison
de toile ou de briques,
Il ne le fera pas dans la joie.

troisième mois d'hiver, 1^{ère} journée

Deir el-Medina : un cas unique dans l'histoire de l'archéologie

Ce site civil bien conservé, alors que la plupart des villes et villages de la vallée ont été détruits en raison de leur occupation permanente, a livré des milliers de documents écrits d'époque ramesside, ainsi qu'un grand nombre d'objets (stèles, statues, objets de la vie quotidienne, etc.). C'est à l'Institut français d'archéologie orientale (IFAO) qu'il revint de mener à bien l'exploration systématique du site.

Bien avant les fouilles, Deir el-Medina fut la proie des agents de «collectionneurs», souvent des consuls, qui revendirent leurs trouvailles à leur gouvernement. En 1832, l'expédition française venue chercher l'obélisque offert par Méhémet-Ali pour commémorer l'expédition d'Égypte se livra à des fouilles dans ce secteur. Au fond d'un puits, on découvrit le magnifique sarcophage en basalte de la reine Ankhnesneferibrê, qui fut acquis par l'Angleterre. En 1886, une mission française mit au jour la sépulture inviolée de Sennedjem (un ouvrier de la nécropole) et de sa famille. L'inventaire fait état d'un mobilier ramesside pour la première fois complet : meubles, statuettes, paniers, linge, vaisselle, etc. Une autre sépulture intacte fut trouvée par des fouilleurs italiens, celle du chef des travaux, Khâ, et de son épouse (fin de la XVIII^e dynastie).

D'autres missions travaillèrent sur le site, mais c'est l'IFAO qui mena à bien une longue série de fouilles sous la direction de Bernard Bruyère, de 1922 à 1940, puis de 1945 à 1951. Les résultats furent spectaculaires : on ne mentionnera que la trouvaille de la tombe décorée de l'ouvrier Sennefer et de son épouse. Lors de son dernier chantier, Bruyère mit au jour le «Grand Puits», profond de 50 mètres, et qui fut comblé dans l'Antiquité, avec des déblais

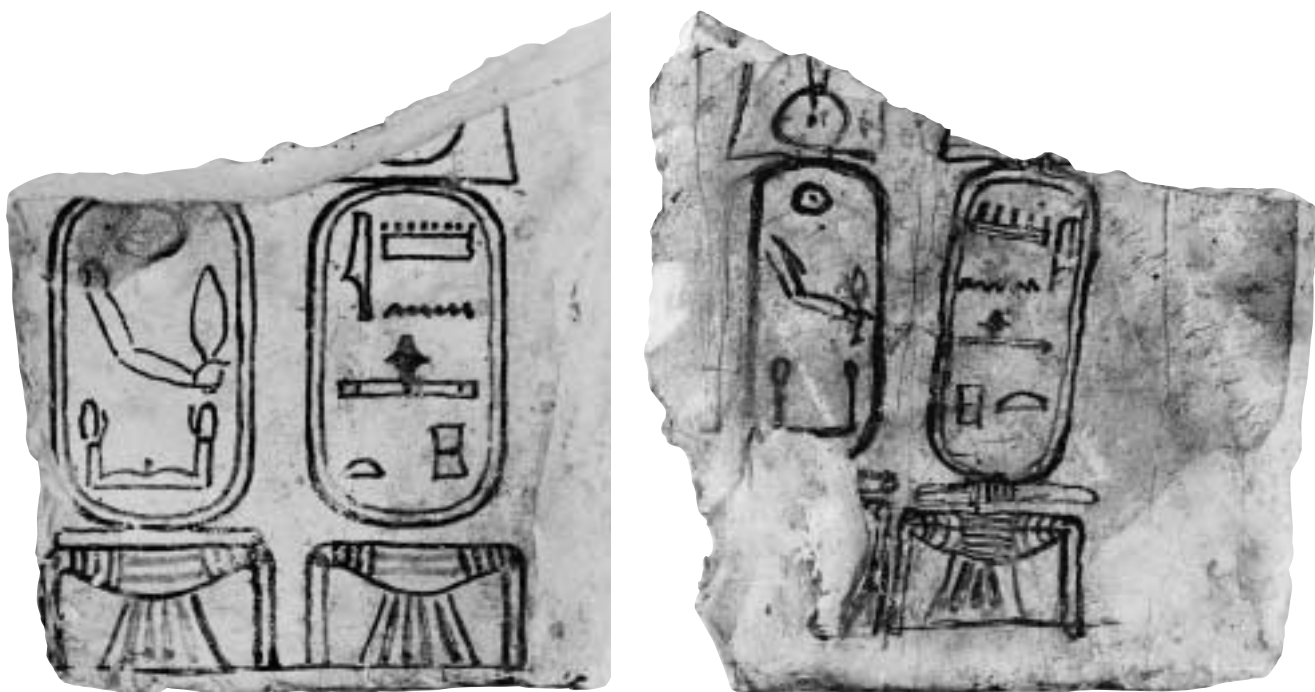
du village riches d'objets archéologiques de toutes sortes ainsi qu'en textes documentaires et littéraires. Les tombes, souvent décorées de peintures splendides, le site du village et les maisons des ouvriers furent mis au jour un à un et soigneusement restaurés.

Sur ce chantier travaillèrent des égyptologues qui consacrèrent leur vie à l'étude de cette manne de documents. Jaroslav Černý étudia les sources documentaires, Georges Posener les textes littéraires et Jean-Jacques Clère devint un maître de l'épigraphie. Par leurs travaux, ils firent connaître la vie quotidienne des ouvriers-artisans de la «Place de Vérité», le nom antique de Deir el-Medina. Leurs apports furent décisifs pour notre connaissance de l'époque ramesside et de la civilisation de l'Égypte pharaonique.

Depuis 1969, de nouvelles études sont en cours, sous l'impulsion de Serge Sauneron, qui était alors directeur de l'IFAO : couverture photographique du site et des tombes, dont beaucoup sont décorées, publication des graffiti que les ouvriers laissèrent dans la montagne thébaine ; entre 1974 et 1976, trois campagnes de fouilles permirent de mieux comprendre l'histoire du village et la chronologie relative du site.

La publication de documents inédits provenant de Deir el-Medina se poursuit encore aujourd'hui (étiquettes de jarres, ostraca, papyrus, sparteries, documents épigraphiques, etc.). Nombre de ces objets de la vie quotidienne sont exposés au musée du Louvre avec d'autres plus imposants.

Yvan KOENIG, Institut d'égyptologie thébaine,
Musée du Louvre



LECLERCQ/MUSEUM - MUSEE DES ANTIQUITES MEDITERRANEEES - Yvan Koenig - Institut d'Égyptologie thébaine - Louvre

4. CETTE REPRÉSENTATION des cartouches du roi Amenotep I^{er} a été dessinée d'une main assurée par le professeur sur l'une des faces de cet ostracon (à gauche). Un étudiant a alors retourné l'ostracon et l'a reproduite (à droite), en inversant certains des signes.



MUSEE ÉGYPTIEN - UNIVERSITÉ DE LOBNA

5. LES FOURS étaient dans la «cuisine», à l'arrière des maisons de Deir el-Medina. Sur ce dessin, les mots «soufflant dans le four» sont visibles dans le texte, à gauche de la femme.

fréquentation par de jeunes enfants. Voici par exemple une petite histoire qui décrit l'expérience scolaire d'un jeune garçon du village dont la mère n'est pas mariée :

«Il fut envoyé à l'école et y apprit à écrire remarquablement. Il pratiqua tous les arts militaires et surpassa ses camarades plus âgés, qui étaient à l'école avec lui. Alors ceux-ci lui dirent : «De qui es-tu le fils? Tu n'as pas de père!» Et ils l'injurèrent et le narguèrent : «Eh toi! Tu n'as pas de père!»

Certains ostraca abandonnés sur place nous informent sur ce qu'étaient l'apprentissage de la lecture, de l'écriture et des connaissances générales. De nombreux documents trouvés dans le village sont, à l'évidence, des exercices d'étudiants, parfois signés de deux noms : celui de l'élève et celui du professeur. Certains portent une date qui indique la fin d'une leçon, et certains portent même plusieurs dates, sans doute parce que les étudiants réutilisaient le même ostracon pour différents cours.

Les signatures présentes sur les ostraca montrent que, bien souvent, les pères ou les grands-pères supervisaient l'éducation de leurs fils ou petits-fils ; cependant des pères – même instruits – envoyaient parfois leurs fils chez un maître d'un rang plus élevé, pour parfaire son apprentissage (une

signature, malheureusement mal conservée, semble être celle d'une étudiante, témoignage qu'une femme, au moins, aurait été instruite ainsi). Les professeurs étaient issus des classes supérieures : les ostraca mentionnent que des scribes, des dessinateurs et des ouvriers en chef occupaient cette fonction.

Les dates figurant sur les ostraca montrent que les étudiants semblent avoir accordé le rythme de leurs cours avec celui de leur activité professionnelle : des textes comportent souvent une série de dates espacées de plusieurs jours parce que, peut-être, les élèves ou les professeurs étaient partis travailler dans les tombes. Malgré leur activité professionnelle, les ouvriers avaient du temps pour étudier. Vers la fin du règne d'un pharaon, lorsque la tombe était presque achevée, ils avaient plus de journées disponibles : lors des étapes finales, ils ne passaient probablement pas plus d'un jour sur quatre dans la Vallée des Rois.

La différence principale de ce système éducatif par rapport à celui des autres cités d'Égypte tient à la diversité de ceux qui apprenaient à lire et à écrire. D'autre part, les matériaux utilisés pour l'écriture, ainsi que le temps disponible pour s'instruire, étaient très différents de ce qui était pratiqué ailleurs. Les travaux d'étudiants retrouvés en d'autres sites

Le magazine
scientifique d'ARTE



AU MOIS DE FÉVRIER :

Mardi 4 février à 20 h :
La première photographie.
Le trafic routier.
Ondes et particules.
L'évolution.
Analyse d'un Rembrandt.

Mardi 11 février à 20 h :
Toiles d'araignées.
Héliographie.
La solubilité.
Datation de la grotte Chauvet.
Les embouteillages.

Mardi 18 février à 20 h :
Tourbillons et turbulence.
La rosée sur les toiles.
Les hémisphères du cerveau.
Le codage des images.
Stalactites et climat.

36 15 ARTE (1,29 F/mn)
<http://www.arte-tv.com>

arte

Dessin d'un étudiant de Deir el-Medina



6. UN DESSIN D'ÉTUDIANT représentant un portrait royal a été corrigé en blanc par son professeur. À Deir el-Medina, les jeunes gens avaient des tuteurs individuels qui leur enseignaient la lecture, l'écriture et les connaissances générales.

étaient rédigés sur du papyrus ayant déjà servi (palimpseste) que pouvaient facilement se procurer ceux qui occupaient un poste officiel (le papyrus était cher). Ces travaux étaient l'œuvre de jeunes apprentis que l'on formait pour des tâches administratives. Chaque jour, ces élèves remplissaient l'équivalent de plusieurs pages de papyrus.

Malgré les particularités du système scolaire adopté à Deir el-Medina, les étudiants du village étudiaient les mêmes matières que les autres, et de la même façon. Dans ce village d'ouvriers-artisans, les professeurs ins-

truisaient, certes, les tailleurs de pierre entre leurs journées de travail, les faisant écrire sur des fragments de pierre (le matériau qu'ils avaient sous la main), mais ils enseignaient les œuvres classiques de la littérature égyptienne, avec pour objectif de leur communiquer une sagesse qui les préparerait à une carrière réussie. Comme un scribe du village l'écrivait à un jeune élève :

«Prends très à cœur l'écriture, car c'est une profession bien utile pour celui qui l'exerce. Ton père savait écrire en hiéroglyphes, et il était respecté de par les rues.»

Andrea McDOWELL a participé à des fouilles sur le site de Deir el-Medina.

Morris BIERBRIER, *Les bâtisseurs de Pharaon*, éditions du Rocher, Monaco, 1986.

Viviane KOENIG, *Un village d'artisans égyptiens sous Ramses IV : Deir el-Medineh*, éditions Albin Michel Jeunesse, 1984.

Pascal VERNUS, *Affaires et scandales sous les Ramsès*, éditions Pygmalion, 1993.

Dominique VALBELLE, *Les ouvriers de la Tombe*, IFAO, Le Caire, 1985.

Yvan KOENIG, *Magie et magiciens dans l'Égypte ancienne*, éditions Pygmalion, 1994.

Jaroslav CERNÝ, *A Community of Workmen at Thebes in the Ramesside Period*, French Institute of Eastern Archaeology, Le Caire, 1973.

Jac. J. JANSSEN, *Commodity Prices from the Ramessid Period : An Economic Study of the Village of Necropolis Workmen at Thebes*, E.J. Brill, Leiden, 1975.

Morris BIERBRIER, *The Tomb-Builders of the Pharaohs*, British Museum Publications, Londres, 1982.

Letters from Ancient Egypt, traduction de Edward F. Wente, sous la direction de Edmund S. Meltzer, Scholars Press, 1990.

La neige artificielle



LES CRISTAUX DE NEIGE ont des formes variées, mais ils ont toujours une symétrie d'ordre six. La microphotographie à gauche montre la forme hexagonale d'un cristal de glace agrandi 4 200 fois. Le point noir au centre du flocon est une particule de protéines produites par la bactérie *Pseudomonas syringae*

lorsqu'elle est refroidie à sec. Ces particules sont des centres de nucléation qui favorisent la cristallisation des molécules d'eau.

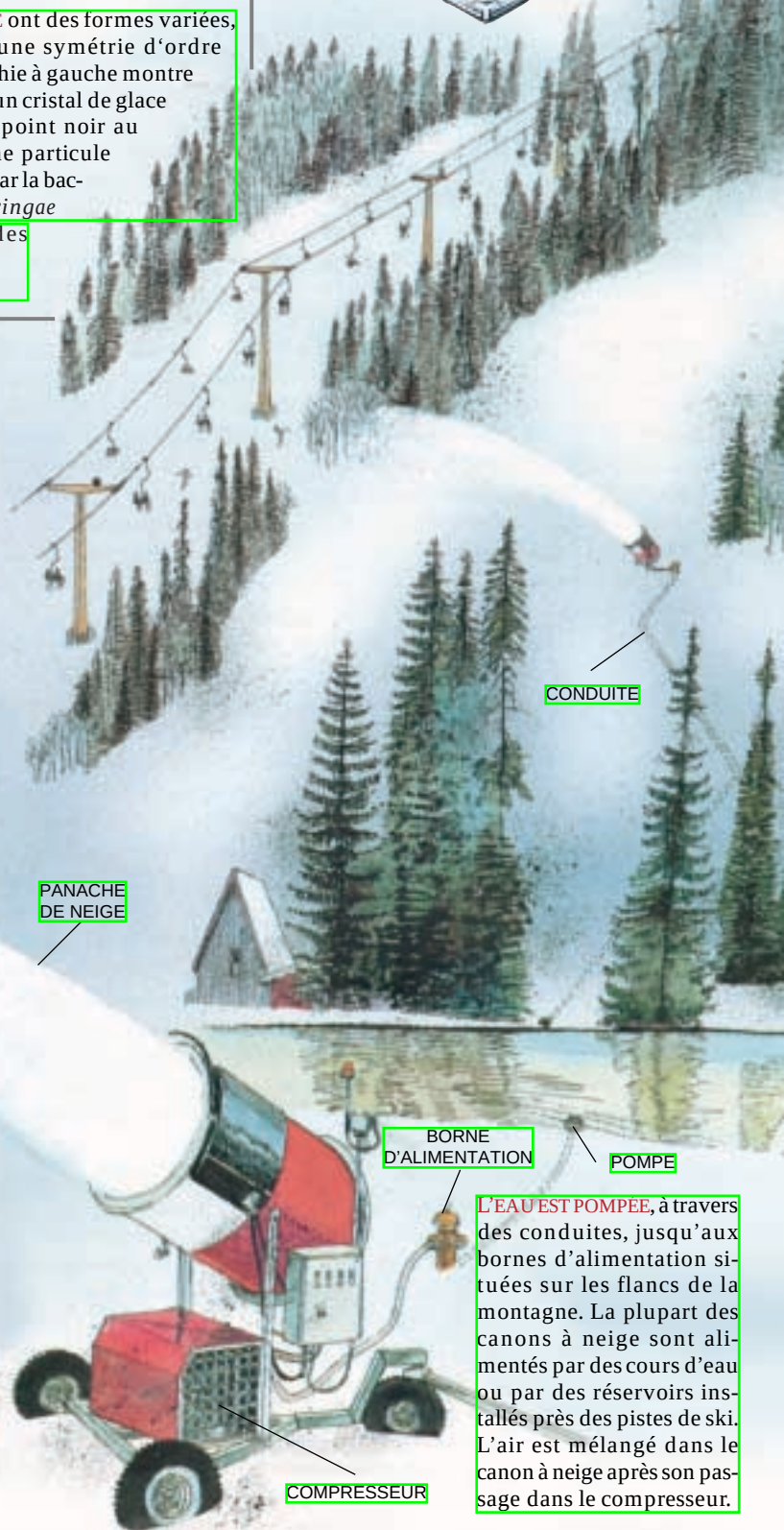
Les skieurs sont souvent inquiets à l'approche de l'hiver : la couche de neige sur les pistes sera-t-elle assez épaisse pour qu'ils puissent pratiquer leur sport favori ? Les stations de sports d'hiver qui souhaitent que la réponse à cette question soit toujours positive se sont équipées de canons à neige.

La neige naturelle se forme dans les nuages par la lente solidification de la vapeur d'eau. La condensation des molécules est favorisée par des particules de poussière. De tels germes de nucléation sont indispensables : l'eau distillée ultrapure peut rester liquide jusqu'à -40°C , un phénomène nommé surfusion.

Les canons à neige ne sont pas alimentés par de l'eau très pure, et le risque de surfusion est faible. Toutefois, pour être certains que les gouttelettes d'eau gèlent dans l'air et ne s'étalent pas sur le sol en plaques de verglas, ils ajoutent à l'eau des particules, protéines ou enzymes, autour desquelles les cristaux de glace se forment.

La neige artificielle n'a pas la même structure que la neige naturelle fraîche : elle est constituée de petites billes de glace, pas de flocons. Elle ressemble toutefois à la neige naturelle qui a évolué et s'est tassée, quelques jours ou quelques semaines, selon les conditions météorologiques, après être tombée. C'est un excellent revêtement pour skier.

LE CANON À NEIGE, relié à une borne d'alimentation par un tuyau, pulvérise l'eau, qui contient des particules autour desquelles les cristaux de neige se forment. Quand l'eau rencontre l'air froid, elle cristallise, puis tombe au sol. Les amas de neige ainsi formés sont ensuite damés sur les pistes.



L'EAU EST POMPEE, à travers des conduites, jusqu'aux bornes d'alimentation situées sur les flancs de la montagne. La plupart des canons à neige sont alimentés par des cours d'eau ou par des réservoirs installés près des pistes de ski. L'air est mélangé dans le canon à neige après son passage dans le compresseur.

Les carrés alphamagiques

IAN STEWART

Les beautés des carrés magiques, numériques et linguistiques.

Le carré magique, où les sommes par lignes, par colonnes et suivant chaque diagonale sont toutes égales, est un thème important des jeux mathématiques. Si l'on en croit une légende chinoise, le plus simple des exemples représenté ci-contre (1), fut révélé à l'empereur Yü sur le dos d'une tortue, au XXIII^e siècle avant J.-C. Le total commun, ou «constante magique», de ce carré est 15, et sa taille, ou «ordre», est 3.

(1)

Des carrés magiques existent pour tout ordre supérieur, ainsi qu'une pléthore de généralisations : cubes, hexagones, octogones, cercles magiques...

On pourrait penser que tout ce qui peut être dit sur de tels carrés l'a déjà été depuis longtemps. Mais il y a dix ans, Lee Sallows inventa une «race» entièrement nouvelle : le carré alphamagique. L. Sallows, un expert de jeux de mots, se spécialisa en combinant la linguistique et la mathématique des jeux (une autre de ses inventions, la *New Merology*, a été décrite dans *Pour la Science*, en mai 1994). Ma participation est fondée sur

deux des articles de L. Sallows dans *The Lighter Side of Mathematics*, édité par Richard Guy et Robert Woodrow (*Mathematical Association of America*, 19XX). Le concept est séduisant. En voici un exemple en anglais :

five	twenty-two	eighteen
twenty-eight	fifteen	two
twelve	eight	twenty-five

D'une part, les mots, quand ils sont transcrits en chiffres, donnent le carré magique conventionnel (2), de constante 45. Mais, d'autre part, si l'on compte le nombre de lettres de chaque mot (traits d'union exclus), le carré obtenu (3) est aussi magique, cette fois de constante 21.

(2)

5	22	18
28	15	2
12	8	25

(3)

4	9	8
11	7	3
6	5	10

L. Sallows a développé une théorie générale de telles constructions. Il commence en définissant $\log(x)$, ou «logarithme» de l'entier x , comme le nombre de lettres du mot x (L. Sallows a combiné le grec *logos*, signifiant «mot», et *arithmos*, signifiant «nombre», en un élégant jeu de mots : logorithme). Un nombre a , dans différentes langues, des logorithmes différents. Nous envisagerons plusieurs langues. Commençons par l'anglais.

Pouvons-nous trouver d'autres carrés alphamagiques en anglais ? Oui, et pour une raison simple : il suffit d'ajouter avant chaque chiffre «one million and». La constante magique du carré numérique augmente de trois millions, et celle de son «dérivé logorithmique», le carré obtenu en remplaçant chaque nombre par son logorithme, croît de trois fois le nombre de lettres de «one million and», soit $3 \times 13 = 39$. En conséquence, il existe une infinité de telles extensions des carrés alphamagiques d'ordre trois. L. Sallows dit que ces carrés sont des «harmoniques» du carré initial et, raisonnablement, les écarte comme des variantes triviales.

Existe-t-il d'autres variantes plus intéressantes ? Au XIX^e siècle, le mathématicien français Édouard Lucas imagina une formule (4), pour tout carré magique d'ordre 3 :

$a+b$	$a-b-c$	$a+c$
$a-b+c$	a	$a+b-c$
$a-c$	$a+b+c$	$a-b$

Pour toutes valeurs de a , b et c , le résultat est magique, et tout carré magique d'ordre 3 est de cette forme. Sa constante est $3a$. Remarquez que toute ligne passant par le terme central porte trois termes en progression arithmétique, c'est-à-dire telle que deux termes successifs diffèrent d'une constante. Par suite, une stratégie raisonnée pour trouver des carrés alphamagiques est de rechercher des triplets d'entiers en progression arithmétique, tels que les logorithmes correspondants soient aussi en progression arithmétique.

Choisissons, par exemple, 15 comme nombre central, puisque nous savons qu'un tel carré alphamagique existe. Alors la table des logorithmes révèle cinq triplets adéquats : (2,15,28), (5,15,25), (8,15,22), (11,15,19) et (12,15,18). Nous pouvons alors essayer avec toutes les paires possibles de ces triplets, par exemple sur les deux diagonales. Ainsi, avec les deux premiers, nous avons le carré (5).

La formule de Lucas nous enseigne que la constante magique vaut toujours trois fois le terme central, soit ici 45. Il n'y a donc qu'une seule manière de compléter le carré, comme indiqué en (6).

Nous pouvons soit rejeter ce cas à cause du terme négatif -8, soit l'écrire «minus eight», de logorithme 10. Dans ce dernier cas, le carré logorithmique dérivé est (7), qui, hélas, n'est pas magique. Cependant, les essais avec les autres paires fournissent rapidement un nouveau carré alphamagique. La réponse à cet excellent exercice d'entraînement est donnée plus loin.

Et si le terme central n'est pas 15 ? L. Sallows écrivit un programme informatique pour chercher d'autres carrés alphamagiques d'ordre 3 et en trouva de nombreux. Un exemple (toujours en anglais) est indiqué en (8).

Le même jeu peut être joué dans d'autres langues. L'encadré de la page 97 indique des exemples en swahili, en gallois, en français

(5)

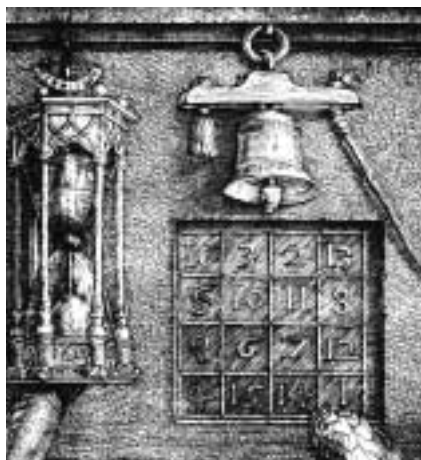
2	18	25
8	15	-8
5	12	28

(7)

3	3	10
11	7	10
4	5	11

(8)

15	72	48
78	45	12
42	18	75



1. Ce carré magique d'ordre 4 est extrait de la gravure de Dürer, *Melencolia*.

et en allemand. Utilisant les entiers jusqu'à 100, L. Sallows a trouvé des carrés alphamagiques d'ordre 3 dans 19 langues, mais aucun en danois et en latin.

En français, il y a exactement un carré alphamagique n'utilisant que des nombres jusqu'à 200, mais 255 autres si les éléments peuvent aller jusqu'à 300. Trois d'entre eux ont pour logarithme neuf entiers consécutifs. L'un d'eux est donné dans l'encadré ci-dessous (le premier nombre entre parenthèses est le terme numérique, le second est son logarithme).

En allemand, il n'y a pas moins de 221 exemples utilisant des nombres inférieurs à 100. L'un d'eux est dans l'encadré. Le principe de base de construction se comprendra si l'on extirpe les syllabes «und» et «zig» et remplace les «mots» restants par des nombres, ce qui donne (9).

J'ai écrit le premier chiffre en rouge, car il doit être multiplié par 10 pour obtenir sa véritable contribution à la valeur numérique : ainsi «fünf-und-vierzig», signifiant cinq-et-quarante. Séparons à présent

les composantes bleues et rouges pour obtenir (10) et (11).

(10)	4 6 5 6 5 4 5 4 6	(11)	3 2 8 8 5 2 2 8 5
------	-------------------------	------	-------------------------

Chacun est un carré latin, les trois mêmes nombres apparaissant dans chaque ligne et chaque colonne (de sorte que colonnes et lignes ont mêmes sommes) et le carré étant aussi magique. C'est encore le cas lorsque les termes en rouge sont multipliés par 10 et lorsque ce dernier carré est ajouté, terme à terme, à celui à termes en bleu. Chacun des nombres obtenus a le même logarithme, 14, le carré initial étant nécessairement alphamagique.

Que dire des ordres supérieurs? L'artifice des carrés latins orthogonaux fonctionne encore. Par exemple, en anglais, le carré dont les termes numériques sont (12) :

(12)	26 37 48 59 49 58 27 36 57 46 39 28 38 29 56 47
------	--

est alphamagique. Les chiffres bleus for-

ment un carré latin d'ordre 4, les rouges de même, et la régularité de la formation des noms des nombres entre 20 et 99, en anglais, fait le reste. L. Sallows baptise du nom «d'ersatz» de tels carrés, car ils ne sont pas trop faciles à trouver. Pour trouver les vrais, il faudra dénicher des cas autrement exceptionnels, tel que (13) :

(13)	31 23 8 15 17 5 21 34 26 38 13 0 3 11 35 28
------	--

Ce champ de recherche comporte au moins trois questions ouvertes, envisageables dans toute langue alphabétique.

1. Un carré est dit «normal» si ses termes sont, à l'ordre près, les entiers consécutifs à partir de 1 inclus. Pour l'ordre 3, il n'y a qu'un seul carré magique normal (à des notations ou réflexions près), et il n'est pas alphamagique. Et pour l'ordre 4? En anglais, le nombre total de lettres pour écrire les noms des 16 premiers entiers est 81, ce qui ferait une constante magique du carré logarithmique associé de... $81/4 = 20,25$. Ce n'est pas un entier et il n'existe donc pas, en anglais, de carré d'ordre 4 alphamagique normal. Il en est de même en français. Le même argument montre que le plus petit ordre envisageable pour un carré normal alphamagique, en anglais, est 14, avec une constante magique de 189. Personne, semble-t-il, ne sait si un tel carré existe effectivement, et c'est là la première question ouverte.

2. Existe-t-il un $3 \times 3 \times 3$ cube alphamagique?

3. Le passage à l'associé logarithmique conduit d'un carré d'entiers à un autre et peut donc être itéré pour donner un dérivé second logarithmique, et ainsi de suite. Jusqu'où peut-on poursuivre le processus en n'obtenant que des carrés magiques? Sans conditions autres, la réponse est : «indéfiniment». Pour voir cela, reprenons le carré alphamagique en allemand analysé précédemment. Son dérivé logarithmique, qui n'est formé que de 14, est trivialement magique. Alors son dérivé second logarithmique n'est, lui, formé que de 8, et ainsi de suite. Mais existe-t-il une langue et des exemples dans lesquels aucun des dérivés logarithmiques de tous ordres ne soit formé de termes tous égaux?

SOLUTION DU PROBLÈME INDIQUÉ

8 19 18
25 15 5
12 11 22

Alphamagique internationale

Le premier nombre entre parenthèses indique la valeur numérique, le second le logarithme.

SWAHILI

arobaini na tano
(45,14)
sabini na moja
(71,12)
hamsini na tano
(55,13)

sitini na saba
(67,12)
hamsini na saba
(57,13)
arobaini na saba
(47,14)

hamsini na tisa
(59,13)
arobaini na tatu
(43,14)
sitini na tisa
(69,12)

GALLOIS

chwech deg dau
(62,12)
wyth deg pedwar
(84,13)
saith deg
(70,8)

wyth deg
(80,7)
saith deg dau
(72,11)
chwech deg pedwar
(64,15)

saith deg pedwar
(74,14)
chwech deg
(60,9)
wyth deg dau
(82,10)

FRANÇAIS

quinze
(15,6)
deux cent douze
(212,13)
cent neuf
(109,8)

deux cent six
(206,11)
cent douze
(112,9)
dix-huit
(18,7)

cent quinze
(115,10)
douze
(12,5)
deux cent neuf
(209,12)

ALLEMAND

fünfundvierzig
(45,14)
achtundsechzig
(68,14)
zweiundfünfzig
(52,14)

zweiundsechzig
(62,14)
fünfundfünfzig
(55,14)
achtundvierzig
(48,14)

achtundfünfzig
(58,14)
zweiundvierzig
(42,12)
fünfundsechzig
(65,14)

Créatures

CHRISTOPH POPPE

Grâce à ce logiciel, des êtres artificiels d'une étonnante complexité naissent, vivent et se reproduisent dans un ordinateur personnel.

Avez-vous déjà rencontré un *norn*? Ses yeux ovoïdes demeurent le font ressembler à E.T., mais il est plus petit, plus velu et plus vif. Il sautille comme un jeune chien, il observe avec curiosité tout ce qui bouge, se précipite dessus et s'y brûle parfois les doigts. Ne vous étonnez pas de ce comportement enfantin : le *norn* sort de l'œuf ; ultérieurement, quand il aura appris, il aura un comportement plus « intelligent ».

L'œuf qui contenait le jeune *norn* était sur une disquette. Il a été couvé dans un fantastique engin qui tient à la fois du four à micro-ondes et du tube à essais... mais il est virtuel : tout comme la couveuse et le monde où évoluent les *norns*, il est le fruit d'un programme informatique nommé *Créatures*. Ce jeu n'est pas un de ces jeux de combat où l'on doit détruire des vaisseaux ennemis et des monstres, et ce n'est pas non plus un de ces jeux classés X qu'il faut interdire aux enfants : l'accouplement des habitants du monde virtuel est court et pudique. Ce monde, nommé *Albia*, est un paradis naturel : une petite éolienne tourne à côté d'une ruche entourée d'abeilles, des carottes pous-

sent, entourées d'autres plantes, et un funiculaire romantique conduit à une île isolée sur laquelle une foule de découvertes nous attendent (voir la figure 1).

Celui qui exécute le programme *Créatures* sur son ordinateur (à cette date, le programme ne fonctionne que sur les ordinateurs de type PC équipés de Windows 95 et d'un lecteur de disques compacts, mais une version française sortira en mars 1997 pour les ordinateurs Macintosh), n'a pas de mission spéciale, mais il peut être le démiurge d'*Albia* : le pointeur de la souris prend la forme d'une main avec laquelle on peut mettre les œufs dans la couveuse, protéger et soigner les *norns*, leur enseigner les bonnes habitudes par des caresses et par des fessées, les encourager à s'accoupler et les protéger contre les plantes empoisonnées, les bactéries et les *grendels*, qui sont des êtres semblables aux *norns*, mais malfaisants. L'éducation des *norns* doit commencer tôt : un *norn* qui n'a pas appris à respecter l'autorité du démiurge risque d'ignorer ultérieurement toutes les indications qui assureront sa survie. Le but du jeu n'est pas de marquer le plus de points pos-

sible en réussissant à élever des *norns* ; c'est surtout de découvrir les beautés des recherches sur la vie artificielle, généralement effectuées sur de gros ordinateurs.

Les jeux informatiques se fondent généralement sur un algorithme : les concepteurs envisagent toutes les situations que peuvent rencontrer les personnages conduits par l'utilisateur ; ils partent habituellement d'un scénario complexe et le décomposent en une suite d'opérations élémentaires, exécutables par l'ordinateur. Dans le cas de *Créatures*, au contraire, les spécialistes de la vie artificielle procèdent de bas en haut : le déroulement complet de la vie des *norns* et des *grendels*, tout comme l'évolution de l'écosystème d'*Albia*, n'ont pas été programmés explicitement, mais résultent d'un nombre de concepts élémentaires aussi réduit que possible.

LES CRÉATURES

Le rêve des spécialistes de vie artificielle serait d'observer, dans une soupe originelle numérique, l'apparition d'une vie qui ressemblerait à celle qui est née sur la Terre, il y a 3,5 milliards d'années. Comme cet objectif semble bien au-delà des possibilités actuelles de l'informatique, les *norns* et les *grendels* ont, d'emblée, été équipés de capacités qui les situent assez haut sur l'échelle de l'évolution : ils disposent d'un riche patrimoine héréditaire, qui code aussi bien les instincts que diverses fonctions mentales et organiques, des comportements innés ou la résistance aux maladies infectieuses.

La vie des créatures dure en moyenne 12 heures d'exécution du programme ; elle est abrégée quand un *norn* est empoi-



1. Le monde virtuel des *norns* est douze fois plus large et trois fois plus haut que les écrans d'ordinateur. La partie du monde qui apparaît sur l'écran suit automatiquement les mouvements de la créature que le joueur examine. La couveuse est dans la cuisine.

Si on y met un œuf, un enfant *norn* qui en sort 20 secondes plus tard explore aussitôt son entourage. Le monde contient des moyens de transport, tels des ascenseurs qui sont fabriqués en tige de bambou, un funiculaire et un sous-marin. Certains objets sont

sonné, par exemple, mais elle atteint 14 heures quand tout se passe bien. Le cas favorable est celui où, la créature ayant passé par six stades évolutifs successifs, avec des apparences et des comportements spécifiques, a en outre pondu ou fécondé quatre à six œufs.

L'activité instantanée des *norns* n'est pas entièrement fixée par leur hérédité et par les circonstances extérieures : leur passé et leur humeur jouent un rôle décisif dans leur comportement. Aussi les *norns* ont-ils parfois des comportements inattendus.

L'idée du programme ne vient pas d'un spécialiste de vie artificielle ou d'un informaticien professionnel, mais d'un professeur en retraite, Stephen Grand, qui vit aujourd'hui dans le Sud-Ouest de l'Angleterre. Ayant commencé à programmer avec le système informatique Logo, mis au point pour un but pédagogique par Seymour Papert, S. Grand continua ses recherches personnelles, alors que l'enthousiasme général était retombé. Le programme *Créatures* a été édité par la Société Millenium, de Cambridge, et il est distribué en France par la Société GT Interactive Warner.

Comment transformer un jeu scientifique en un produit avec lequel on pourrait s'amuser ? Ceux qui ont repris le travail de S. Grand se sont un peu écartés des préoccupations des spécialistes de la vie artificielle, afin que les créatures survivent plus qu'un instant. Dans le programme actuel, rares sont les circonstances qui font mourir de faim tous les *norns*, et les bébé *norns* n'ont pas tout à apprendre par essais et erreurs : certains comportements (nommés instincts) ont été rendus innés, comme par exemple de porter à la bouche tout ce qui leur tombe sous la main (ils attra-

Procurez-vous le logiciel *Créatures* par la revue *Pour la Science* (voir page 65).

pent ainsi de la nourriture avec une plus grande probabilité) ; progressivement ces comportements sont remplacés par des comportements appris. Et le créateur du monde artificiel a, dans sa grande sagesse, disposé la cafetière, les bouteilles d'eau-de-vie et les citrons suffisamment haut pour que les plus jeunes ne puissent pas les attraper.

Inversement les *norns* ne prolifèrent pas excessivement, car les bactéries grouillent dans *Albia* ; et les *norns* malades peuvent transmettre leur infection par la toux ou par l'éternuement. Or, sans une plante guérisseuse absorbée au moment approprié, la fièvre tue les *norns*. Le joueur peut, en conséquence, administrer la médecine nécessaire (il lui suffit de mettre le *norn* en présence des plantes guérisseuses, qui seront mises en bouche, par exemple) ou, s'il craint la surpopulation, les attirer vers les dangers.

L'hérédité *norn* est également inspirée de l'hérédité réelle, mais les règles ont été assouplies. La plupart des mutations ne sont pas mortelles : grâce à un codage approprié, les informations génétiques ne peuvent jamais contenir de « fautes de grammaire », même après une mutation. S. Grand utilise ici des idées provenant de la technique des algorithmes génétiques, qui recombinaient des programmes, tout comme l'évolution naturelle recombine les génomes des individus.

Lors de la fécondation de certains organismes réels, des séquences s'échangent entre le chromosome maternel et le chromosome paternel : après la juxtaposition de ces deux chro-

mosomes, ces derniers sont découpés, et les morceaux correspondants s'échangent. Par ce moyen, l'enfant hérite d'attributs de ses deux parents. Cette recombinaison a également lieu lors de la reproduction des *norns*. Et, comme chez les véritables êtres vivants, des caractères se retrouvent associés, alors qu'ils n'ont initialement rien à voir. Par exemple, après quelques générations, les *norns* agressifs pourront tous avoir un visage bleu foncé.

Dans la nature, lorsque les points de coupure des chromosomes ne correspondent pas exactement, des gènes peuvent être doublés ou perdus. Ce phénomène se retrouve dans les créatures d'*Albia* : seuls quelques gènes vitaux sont protégés des mutations, de la disparition ou du dédoublement, afin que le joueur puisse jouir de nouveaux *norns* en bonne santé. Pour simplifier la génétique des *norns*, les créateurs de *Créatures* ont décidé que le patrimoine génétique des créatures artificielles serait contenu sur un seul brin, chez le mâle comme chez la femelle ; les gènes spécifiques d'un sexe sont passifs quand ils sont présents chez un individu qui n'est pas de ce sexe, mais ils peuvent redevenir actifs chez leurs enfants.

UN COUP D'ŒIL DANS LES COULISSES

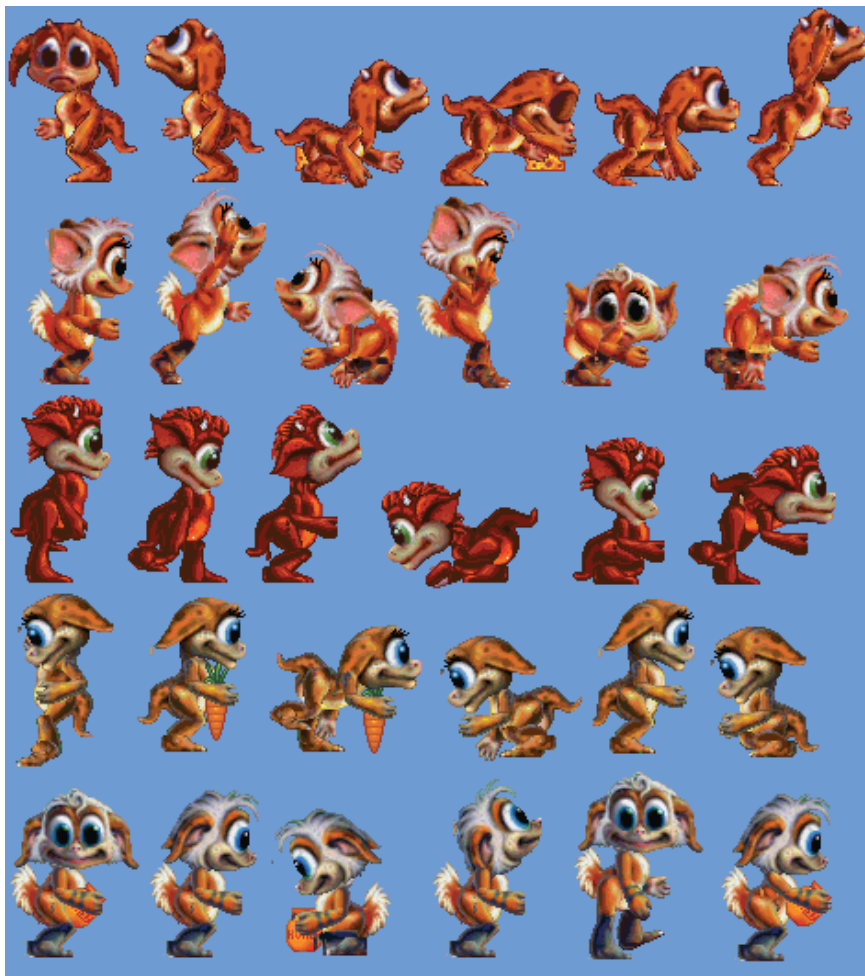
Quelle est la vie interne des *norns* ? On apprend progressivement en observant les *norns* parcourir leur monde. Un peu d'attention montre rapidement que le stress raccourcit leur vie.

La capacité de calcul d'un petit ordinateur personnel suffit pour calculer, toutes les dix secondes, un nouvel état



des jouets, tel un ballon, et une machine qui enseigne automatiquement quelques mots aux créatures. Quelques aliments de base, tels des carottes, du fromage et du miel, fournissent aux créatures l'énergie vitale nécessaire. Une douche règle leur température,

le café dans le pot aide à lutter contre la fatigue, un projecteur de diapositives les divertit. Grâce à la souris de l'ordinateur, qui apparaît à l'écran sous la forme d'une main, l'utilisateur peut intervenir dans le monde des créatures.



2. Cinq norns dans six attitudes différentes. Des caractéristiques telles que la couleur du corps, l'allure ou la forme des oreilles sont déterminées génétiquement et peuvent changer avec l'âge. L'expression du visage donne une information sur l'état d'esprit des créatures.

du monde où évoluent les *norns*, tant que leur nombre n'est pas excessif (dix est une limite, en pratique). Une grande partie de ce temps est consacrée à la représentation graphique (très précise et réaliste) du nouvel état. Comment les concepteurs du jeu ont-ils obtenu ce remarquable résultat, malgré les limitations des petits ordinateurs ?

Tout d'abord, le monde représenté n'est pas aussi compliqué qu'il le paraît. C'est un monde à deux dimensions seulement, où les créatures ont peu de liberté. L'impression de variété est donnée parce qu'une même action, appliquée à des objets différents, peut signifier des choses très différentes : manger une carotte, boire un café, mettre en marche une éolienne ou un sous-marin, ou bien brancher la couveuse.

Le système de perception des créatures est extrêmement simplifié. Les informations de l'extérieur parviennent au cerveau sous une forme abstraite : un objet envoie une information sous la forme de quelques bits, lorsqu'il apparaît dans le champ visuel d'un *norn*, quand il bouge

ou bien quand il se transforme. On parle avec les créatures en tapant des mots au clavier de l'ordinateur.

Naturellement les *norns* semblent des êtres complexes, puisqu'ils peuvent même apprendre quelques mots ; toutefois, la programmation de cette capacité n'a rien d'extraordinaire : dans le cerveau des *norns*, une toute petite place sert à stocker les noms des objets et des actions. Quand un *norn* perçoit suffisamment souvent un mot en même temps qu'il tient un objet ou qu'il fait une action, le mot est mémorisé. Et si l'on n'a pas le courage d'enseigner aux *norns* à parler, on peut toujours utiliser une machine d'enseignement, au rez-de-chaussée de la maison qui contient la couveuse.

La langue primitive des *norns* leur permet de se parler de leur environnement ou d'apprendre de nouveaux mots en s'écoulant mutuellement. Ainsi un langage primitif peut se transmettre de génération en génération.

Les deux éléments centraux qui déterminent la vie d'un *norn* sont, d'une

part, son cerveau et, d'autre part, une foule de paramètres qui dirigent son métabolisme et son comportement. Le cerveau des *norns* est un réseau de 1 000 neurones artificiels (ce nombre, déterminé génétiquement, peut être modifié dans la descendance par mutation) : ces unités de calcul rudimentaires sont groupées en structures assurant des fonctions variées (voir l'encadré page 103). Malgré sa simplicité, le cerveau des *norns* trouve de l'ordre dans les données qui lui sont soumises, et il mémorise les relations découvertes ; comme il s'agit d'un réseau de neurones formels, les associations et les mémorisations sont implicitement codées. Pour chaque situation, le cerveau enregistre aussi les comportements qui seraient utiles dans les diverses situations rencontrées, par exemple assouvir un besoin urgent ou calmer une douleur.

Les représentations du cerveau des créatures s'inspirent largement du comportement, non pas parce que les auteurs étaient convaincus par cette théorie, mais parce que celle-ci postule une structure du cerveau très simple, qui permet de réduire le temps de calcul. Selon cette théorie, le comportement des individus est déterminé par leur vécu : au cours de leur vie, les individus apprennent à répéter les comportements avantageux et à éviter les réactions pénalisantes. Dans cette hypothèse, une représentation détaillée du monde, des sentiments, des buts et des stratégies pour atteindre ces buts est inutile.

Munis de leur petite capacité intellectuelle, les *norns* n'ont pas spontanément l'idée de cultiver des carottes ou de séduire l'autre sexe en offrant des présents appropriés (un tel comportement peut toutefois apparaître à l'occasion d'une association, sans interprétation explicite), mais ils ont une idée primitive de l'espace : ils savent où ils ont déjà trouvé à manger et se dirigent spontanément vers ces endroits.

EN PASSANT PAR LA CHIMIE

La digestion des *norns*, leur fatigue, leur agressivité, leurs «envies» et leurs «sensations» de douleur ou de plaisir, leurs maladies et leur mort sont déterminées par des paramètres qui sont présentés dans le jeu comme des concentrations en diverses molécules : certaines ont des noms connus, tels «glucose», «glycogène» ou «adrénaline», mais d'autres sont plus globales, telles «chaleur», «sommolence», «récompense» ou «punition». Le nom importe peu, car les «sentiments», les «substances chimiques» ou les «températures» ne sont que des

Le cerveau des *norns*

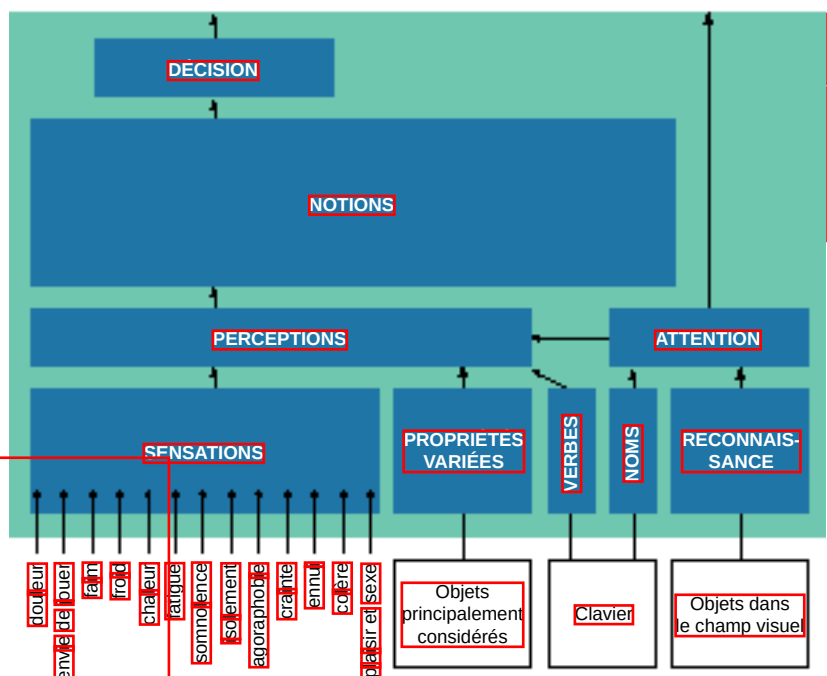
Les *norns* et les *grendels* sont capables d'apprendre, parce qu'ils ont, en guise de cerveau, un réseau de neurones artificiels, qui transforme les stimuli externes et les sensations en un état interne, lequel est ensuite converti en actions. La structure de ce «cerveau» est déterminée génétiquement, comme la plupart des caractéristiques des *norns*. Il est possible que, par suite de mutations, les générations futures de *norns* disposent d'un cerveau plus gros, plus petit ou construit différemment. La structure de base décrite ici est celle dont sont pourvues les créatures de la première génération.

Les réseaux de neurones formels, tel celui qui constitue le «cerveau» des *norns*, sont composés d'unités élémentaires de calcul nommées neurones formels. Comme les vrais neurones, ces derniers reçoivent des signaux des autres neurones formels. Les réseaux de neurones classiques sont généralement organisés en couches, l'information circulant d'une couche à la couche immédiatement supérieure. Elle passe ainsi de la couche d'entrée (les organes sensoriels) jusqu'à la couche de sortie, où se manifeste le résultat de l'activité neuronale. Chaque neurone convertit le signal entrant en un nombre (qui représente l'activité du neurone), qu'il transmet ensuite aux neurones plus en aval ; l'information ne tourne pas en rond.

Les neurones formels des *norns* sont équipés d'une petite mémoire à court terme et d'une petite mémoire à long terme : de la sorte, les informations mémorisées ne déterminent pas entièrement le comportement, mais ce qui s'est déjà produit intervient avec un effet qui s'amenuise progressivement. Enfin, dans la couche de sortie du réseau, le neurone dont l'activité est maximale bloque tous les autres.

Ce modèle des couches, légèrement modifié, a été repris pour la construction des *norns*. Les couches se nomment ici des lobes de cerveau (les rectangles de la figure). Tous les neurones d'un lobe sont semblables, mais leurs caractéristiques et la structure de leurs liaisons sont très différentes selon les lobes. Le principe du blocage par le neurone le plus actif oblige les créatures à ne s'intéresser qu'à un seul objet à la fois et à faire seulement ce dont elles ont le plus envie parmi les nombreuses choses qu'elles voudraient parfois faire.

Le cerveau des *norns* leur permet surtout d'apprendre grâce à leurs expériences. Ainsi les neurones du lobe sensoriel se spécialisent dans la détection de combinaisons d'événements qui se produisent souvent. Le lobe de compréhension, qui contient la majorité des neurones, combine ceux-ci en «notions». Ici sont stockées les expériences que la créature a déjà vécues, ainsi que la situation et ses propres réactions : si un *norn* s'est brûlé à un moment où il voyait le ballon rebondir et où il s'intéressait à un four, son cerveau stocke une règle empirique du type : «si le ballon rebondit et que le four est là, alors il ne faut pas toucher le four.» Une telle association s'établit

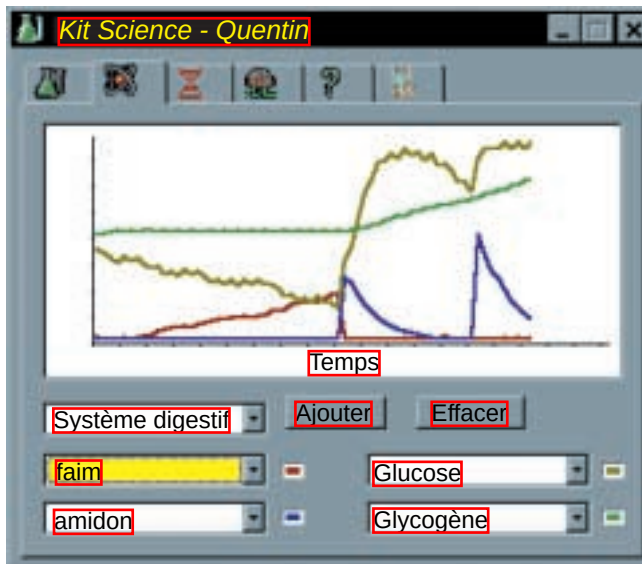


automatiquement ; de plus, si, ultérieurement, le *norn* voit le four sans le ballon, il reconnaîtra la situation comme semblable à la précédente, et il éloignera ses doigts du four.

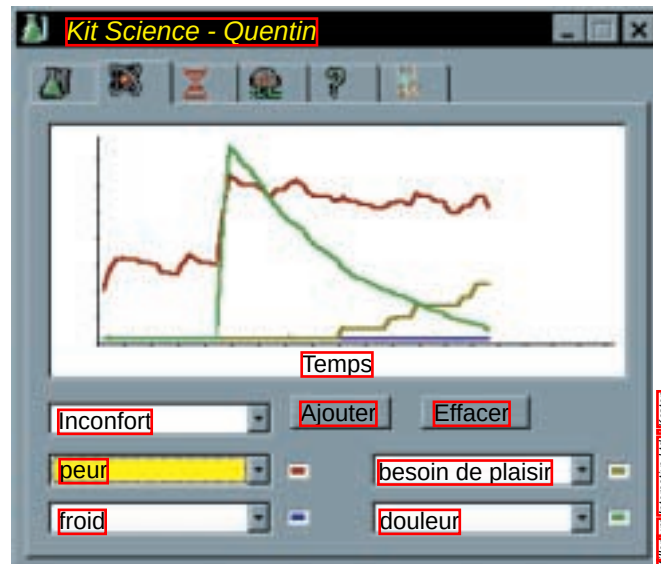
De telles règles expérimentales ne sont pas mémorisées explicitement dans le réseau de neurones, mais dans ce qu'on nomme les poids des connexions synaptiques, c'est-à-dire des facteurs d'amplification qui déterminent à partir de quelle intensité et pour quel signe l'activité d'un neurone a des conséquences sur le neurone suivant. L'apprentissage est assuré par un changement des poids synaptiques.

Ce changement est assuré par un algorithme de rétro-propagation, qui permet un transfert d'information à contre courant du flux général. Chez les créatures, ce ne sont pas des synapses qui font ce travail, mais les changements sont assurés par voie chimique : une expérience agréable, par exemple, libère une substance de récompense. Une synapse qui a participé à une décision effectivement prise par la créature reste pour quelque temps réceptive à cette substance : son poids augmente lorsque le succès se répète. De même, une substance de punition diminue le poids des synapses qui ont emporté pour la décision, lorsque la décision a été mauvaise. Pour les synapses qui avaient pris position contre la décision, les substances ont l'effet opposé. Les noms des substances qui règlent ainsi le comportement des *norns* révèlent l'origine behavioriste du codage utilisé. L'instance de récompense ou de punition n'est plus ici un expérimentateur qui donne de la viande à un chien en faisant sonner une cloche ; elle siège dans le cerveau même de la créature.

Les neurones et les synapses des créatures ne sont pas assez nombreux pour enregistrer toutes les situations imaginables. C'est pourquoi le système veille à ce qu'il y ait toujours suffisamment de neurones et de synapses disponibles. À cette fin, les liaisons peu utilisées diminuent progressivement et peuvent même disparaître.



3. Une partie du programme nommée *Kit Science* montre l'état interne des *norns*. Ici le *Kit Science* montre l'état interne du *norn* nommé Quentin. Lors d'un effort, la concentration en glucose dans le sang diminue, et la faim augmente (à gauche). Quand Quentin mange une carotte, la concentration en amidon croît soudainement et rediminue peu à peu en se transformant en glucose, qui, lui-même, se transforme – bien plus lentement – en glycogène. Simultanément la



faim diminue brusquement. La deuxième carotte, que Quentin mange peu avant la fin de l'intervalle de temps représenté, est plus grosse et élève la concentration en glucose jusqu'à son maximum. Quand Quentin touche le four brûlant (à droite), la douleur augmente rapidement, mais se calme assez vite aussi, alors que le niveau de peur, qui a aussi monté, diminue plus lentement. Après un moment, l'instinct du jeu renaît.

nombre de systèmes d'équations. Ainsi le «glucose» est produit à partir de l'«amidon» ; il se transforme réversiblement en «glycogène» et il est indispensable à la bonne «santé» des *norns* (voir la figure 3). En outre, il libère une «substance» nommée «diminution de la faim», qui diminue la quantité de substance «faim». L'«alcool» des *norns* est une substance qui produit une démarche chancelante et qui augmente l'agressivité des mâles et la disposition à l'accouplement des femelles.

A chaque instant, ces substances se modifient conformément aux équations initialement programmées. Le changement est calqué sur ce que les chimistes nomment la loi d'action de masses, de sorte qu'il engendre des comportements plausibles.

Dans le programme, chaque substance, chaque neurone et chaque objet sont des objets, au sens de la «programmation orientée objet» : ce sont des constructions indépendantes, qui exécutent leurs propres règles de calcul lorsque le programme principal le leur permet. L'indépendance des objets facilite la construction de nouveaux objets : ils ne viennent pas gêner ceux qui existaient déjà.

LE FUTUR D'UN MONDE

Les concepteurs du jeu ont fait en sorte que les *norns* se comportent comme des animaux domestiques, vifs et sympathiques, mais la construction ascendante ne leur permet pas de prévoir

l'évolution de ces créatures. Déjà, *Albia* leur a réservé quelques surprises : ils ont vu deux *norns* se mettre à jouer spontanément au ballon, parce qu'ils avaient découvert que le jeu leur procurait du plaisir. Une autre fois, ils ont vu un *norn* mâle poursuivre une femelle qui s'enfuyait, parce qu'elle n'avait manifestement pas envie de se reproduire ; finalement le mâle a abandonné et s'est endormi, frustré. Et, un jour, un joueur qui revenait de déjeuner, après avoir laissé son ordinateur branché, a retrouvé une ribambelle d'enfants qui étaient nés en son absence : une des créatures avait découvert qu'elle pouvait se procurer des camarades de jeu en mettant les œufs dans la couveuse pour les faire éclore plus vite.

Après de nombreuses générations de *norns*, les évolutions surprenantes ne devraient pas manquer. Vraisemblablement des *norns* seront plus robustes ou plus fertiles que leurs ancêtres, en raison de mutations favorables. Comme on peut envoyer des *norns* par courrier électronique, ces *norns* évolués devraient se propager, et le distributeur de programmes devrait en voir de toutes les couleurs.

Une culture albiannaise se développera-t-elle ? Les *norns* finiront-ils par apprendre ce que savent leurs parents ? Des groupes de créatures se différencieront-ils au point que les individus de deux groupes différents ne pourront plus se reproduire ? Ce serait la naissance de nouvelles espèces... Ou bien l'évolution des *norns* s'éloignera-

t-elle de plus en plus de l'évolution biologique, parce que le modèle théorique a été mal choisi ?

Toutes les équations programmées peuvent muter. Aucune loi n'empêche une mutation qui conduirait à une meilleure conversion du glucose en glycogène : des créatures pourraient progressivement, si cette conversion devenait extrêmement efficace, disposer d'une réserve de glucose quasi inépuisable. De même, l'immortalité ou la production illimitée d'œufs sont envisageables.

Dans un texte devenu célèbre, le mathématicien anglais Alan Turing (1912-1954) avait imaginé un test pour savoir si une machine pouvait penser : il proposait qu'on déclare intelligente une machine qui pourrait dialoguer avec un être humain au point que ce dernier ne puisse pas deviner qu'il converse avec une machine.

De même, si les créatures artificielles présentent toutes les caractéristiques que l'on attribue habituellement aux organismes vivants, doit-on admettre qu'elles sont vivantes ?

Christoph Pöppe est éditeur à la revue *Spektrum der Wissenschaft*, à Heidelberg.

From Animals to Animats 3 : Proceedings of the 3rd International Conference on the Simulation of Adaptive Behavior (SAB94), sous la direction de D. Cliff, P. Husbands, J.-A. Meyer et S.W. Wilson, MIT Press, 1994.

Site Web de la Société Millenium Interactive : <http://www.cyberlife.co.uk>.

Une comète par la queue

SHAWN CARLSON

Participez à la recherche cométaire en observant la comète Hale-Bopp.



1. Au mois d'octobre 1996, le noyau de la comète Hale-Bopp était déjà très actif, comme l'attestent les jets de gaz qui s'en échappent.

Le 9 mars 1997, quand il sera 0h 41 en temps universel, quelques âmes courageuses braveront l'hiver sibérien pour assister à une éclipse totale de Soleil. Tandis que l'ombre de la Lune hâtera sa course vers le Nord, les observateurs intrépides verront, outre la spectaculaire couronne solaire, un rai de lumière zébrant le ciel assombri. La comète Hale-Bopp, la plus brillante comète depuis 20 ans, sera à 22 jours seulement de sa plus courte distance au Soleil (périhélie) et à 13 jours de sa plus courte distance à la Terre. Sa queue brillante offrira un spectacle mémorable.

Si vous n'avez pas prévu de randonnée en Sibérie à cette période, rassurez-vous : la comète Hale-Bopp sera visible de toute la Terre. Elle donnera aussi aux amateurs l'opportunité de contribuer à la recherche cométaire : le Centre d'astrophysique de Cambridge, dans le Massachusetts, coordonne un réseau mondial d'observateurs auquel tout le monde peut participer.

L'intérêt des astronomes pour cette comète réside dans l'activité exceptionnelle attendue pour son noyau (voir la figure 1). Un noyau cométaire est une boule de glace et de roches dont la surface s'évapore à l'approche du Soleil.

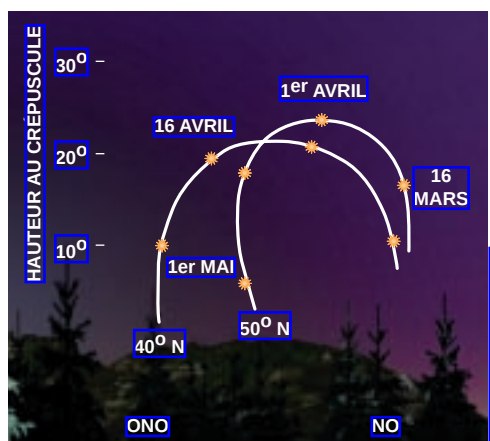
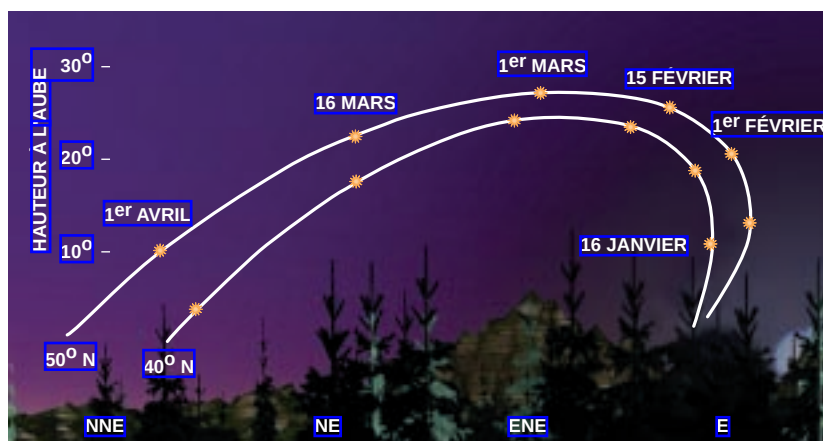
Les jets de gaz et de poussières qui en résultent forment les queues de la comète. La poussière éjectée suit un chemin incurvé, tandis que les gaz ionisés s'éloignent en ligne droite, à l'opposé du Soleil. L'émission des jets par le noyau a commencé lorsque la comète a croisé l'orbite de Jupiter, à environ sept unités astronomiques du Soleil (une unité astronomique, ou UA, est la distance moyenne du Soleil à la Terre, soit 150 millions de kilomètres). Les amateurs entraînés suivent la comète Hale-Bopp à l'œil nu depuis mai 1996, alors que la plupart des comètes sont observables à l'œil nu quelques mois seulement avant leur passage au périhélie. Pour la majorité des amateurs, Hale-Bopp est visible depuis le mois de janvier 1997.

Les queues des comètes (celle de poussière et celle de gaz) révèlent leur composition et leur structure. Elles fournissent aussi aux observateurs ravis sur Terre un laboratoire spatial pour cartographier le vent solaire, car les queues de gaz s'ornent parfois de structures produites par l'interaction avec ce vent. En 1974, la comète Kohoutek avait ravi les astronomes en exhibant deux structures proéminentes, fruits de ces interactions turbulentes.

Tout amateur peut enregistrer ces caractéristiques des queues de comète. Vous aurez d'abord besoin d'un bon atlas stellaire (*Uranometria*, aux éditions Willmann-Bell, coûte 455 francs), qui indique la position des étoiles en ascension droite et en déclinaison (l'équivalent de la longitude et de la latitude sur la sphère terrestre). Vous aurez également besoin d'un compas et d'un arc pour mesurer les écarts angulaires. L'arc, construit avec une règle graduée flexible et un long morceau de bois (voir l'encadré ci-contre), permettra de localiser les détails des queues à environ 0,1 degré près.

Localisez la tête de la comète en mesurant la distance angulaire entre cette tête et les trois plus proches étoiles dans l'atlas. Les cartes célestes indiquent les positions des étoiles en termes de déclinaison et d'ascension droite ; pour convertir les angles en distances sur la carte, notez qu'une heure d'ascension droite est égale à 15 degrés à l'équateur céleste. Partout ailleurs, divisez la distance angulaire à l'équateur par le cosinus de la déclinaison.

Pour chaque mesure, ouvrez le compas de l'angle approprié et inscrivez un petit arc de cercle là où vous pensez trouver la tête de la comète. La position



2. La comète Hale-Bopp sera visible durant plus de quatre mois dans le ciel matinal (avant son périhélie) et en soirée (après son périhélie). Plus la latitude de l'observateur sera grande, meilleure sera la visibilité (Paris est à 49 degrés de latitude Nord, Bordeaux à 45 degrés).

précise de celle-ci est le point où les trois arcs se coupent. Suivez cette procédure pour tous les détails majeurs des queues cométaires, puis passez aux détails plus fins. Utilisez un télescope ou des jumelles pour cette partie. Dessinez les queues directement sur la page appropriée de l'atlas céleste (ou sur une bonne photocopie). En effectuant ces relevés chaque nuit, vous participez à l'étude de l'évolution des queues cométaires.

La chevelure de la comète, ou coma, qui entoure le noyau, change aussi de taille et de luminosité au cours du temps. Le meilleur moyen pour mesurer sa dimension est d'utiliser un oculaire réticulé gradué, monté sur une lunette ou sur un télescope. Ces oculaires sont assez onéreux, mais sont précis (celui vendu par la Société *Celestron* coûte environ 1 400 francs)

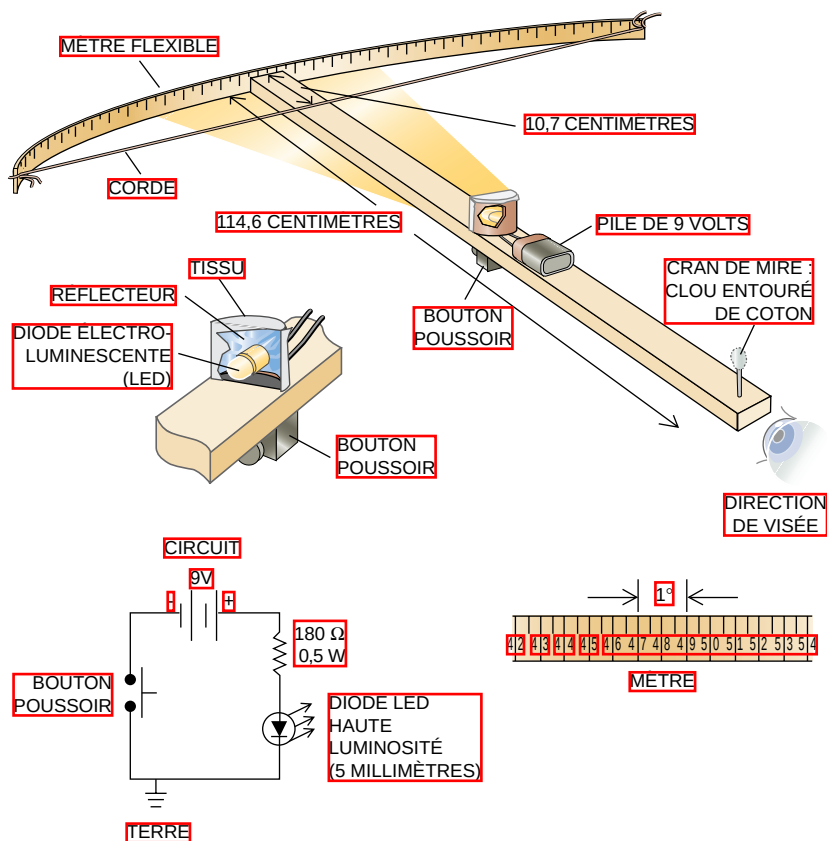
Ceux qui n'auraient pas envie d'investir autant peuvent utiliser une méthode indirecte pour mesurer la dimension angulaire de la coma. Avec un télescope et un oculaire réticulé simple (900 francs), visez la coma pour la placer au centre du réticule. Laissez la rotation de la Terre faire sortir la comète du champ de vue. Tournez le réticule de façon que la comète se déplace le long de la ligne horizontale, puis comptez combien de secondes s'écoulent pendant que la tête cométaire traverse complètement la ligne verticale. Si vous connaissez la déclinaison de la comète (à partir des mesures de position sur l'atlas), la taille angulaire de la coma (en minutes d'arc) est le cosinus de la déclinaison divisé par quatre et multiplié par le nombre de secondes. Recommencez la mesure au moins trois fois et prenez la moyenne des résultats.

Avec un petit télescope et un peu d'entraînement, vous pouvez également estimer la luminosité de la comète – sa magnitude visuelle – en comparant celle-ci avec celle d'étoiles connues. Faites le point sur la comète à l'aide d'un oculaire de faible grossissement (pas plus de 2× par centimètre d'ouverture du télescope), et mémorisez son image. Pointez ensuite votre télescope sur une étoile proche de magnitude connue et déréglez la mise au point jusqu'à ce que l'étoile ait la même taille que la comète. Comparez ensuite mentalement la luminosité de l'étoile floue et celle de la comète. Trouvez une étoile légèrement moins brillante que la comète et une un peu plus brillante : vous pouvez ainsi estimer l'intervalle de magnitude de la comète (une magnitude inférieure indique un objet plus brillant). Pour plus d'informations sur l'échelle des magnitudes, consultez un livre d'astronomie.

L'estimation des magnitudes requiert quelques précautions. L'atmosphère absorbe plus la lumière lorsqu'une étoile

La construction d'un arc de visée angulaire

Placez le cran de mire à 114,6 centimètres de la règle flexible de un mètre de long. Vu du cran de mire, chaque intervalle de deux centimètres sous-tendra exactement un angle de un degré. Peignez de fines lignes blanches pour marquer les degrés et les demi-degrés (une fente découpée dans une carte à jouer fait un pochoir parfait). Une diode électroluminescente éclaire la règle pour faciliter la lecture de nuit.



– ou une comète – est proche de l'horizon ; aussi, si la comète est à moins de 30 degrés au-dessus de l'horizon, comparez-la seulement à des étoiles d'élévation similaire. N'utilisez pas d'étoiles rouges pour cette comparaison, car l'œil est peu sensible à cette couleur. Si votre atlas répertorie l'étoile comme de type

K, M, R ou N, ou si sa magnitude V-B (visible moins bleu) est supérieure à 1,0, cherchez une étoile plus bleue pour la comparaison. Pour vous entraîner aux comparaisons de magnitude, estimez la luminosité d'étoiles de magnitude connue. Les observateurs aguerris atteignent une précision de 0,1 ou 0,2 de magnitude.

Communiquez vos résultats : les informations ne sont utiles que si elles sont partagées. Vous pouvez envoyer vos observations à la Société astronomique de France, Commission des comètes, 3, rue Beethoven, 75016 Paris. Cette commission rassemble les observations françaises et les communique à la Commission internationale sur les comètes, au Centre d'astrophysique de Cambridge. Vous pouvez également leur envoyer directement vos observations : Daniel Green, Smithsonian Astrophysical Observatory, 60, Garden Street,

Cambridge, MA 02138, États-Unis (courrier électronique : icq@cfa.harvard.edu). Sur le site Web de la Commission internationale, vous trouverez des précisions sur les techniques d'observations (<http://cfawww.harvard.edu/cfa/ps/icq.html>).

Vous trouverez oculaires, atlas et livres sur les comètes à la Maison de l'astronomie, 35, rue de Rivoli, 75004 Paris, tél. 01 42 77 99 55. Le premier tome du Guide de l'observateur (éditions de la Société d'astronomie populaire, 240 francs) contient un chapitre consacré à l'observation des comètes.

Une brasse rapide

Le règlement de la brasse autorise le nageur à se déplacer sous l'eau, mais une partie du corps doit émerger à chaque cycle : en pratique, c'est la tête, dont la sortie permet les échanges respiratoires. Lorsque Frédéric Deburghgraeve, détenteur du record du monde sur 100 mètres, accomplit ce mouvement, une étrange protubérance se dresse devant sa bouche.

Au cours d'un cycle de brasse, le mouvement des bras est simultané et se décompose en quatre phases, les trois premières étant essentiellement propulsives. Le nageur effectue d'abord un balayage vers l'extérieur (a), puis vers le bas, le buste commençant à monter (b). Son visage est complètement immergé : après un temps d'apnée, il expire.

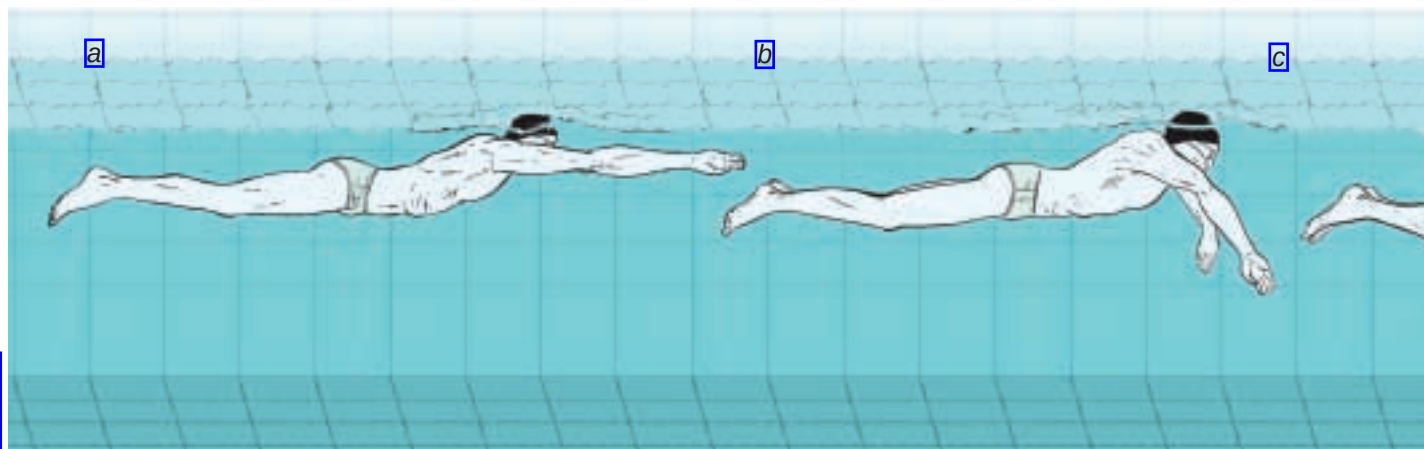
Dans la phase suivante, la plus propulsive, les bras balayent l'eau vers l'intérieur et vers le haut. Au moment où les mains arrivent sous la tête, le corps atteint sa plus grande vitesse et sa plus grande verticalité (c). Le menton sort alors de l'eau. Les mains déplacent d'importantes masses d'eau qui percutent la surface inférieure du menton du nageur : la gerbe qui s'élève au-dessus de la surface se divise alors en deux. Le nageur profite du tube d'air ainsi formé entre les deux parties de la gerbe pour inspirer. Il bascule ensuite vers l'avant le plus vite possible (d) et il enchaîne une ondulation pour diminuer les résistances à l'avancement et exploiter la vitesse acquise (e).

Michel SIDNEY,
Faculté des sciences du sport, Lille

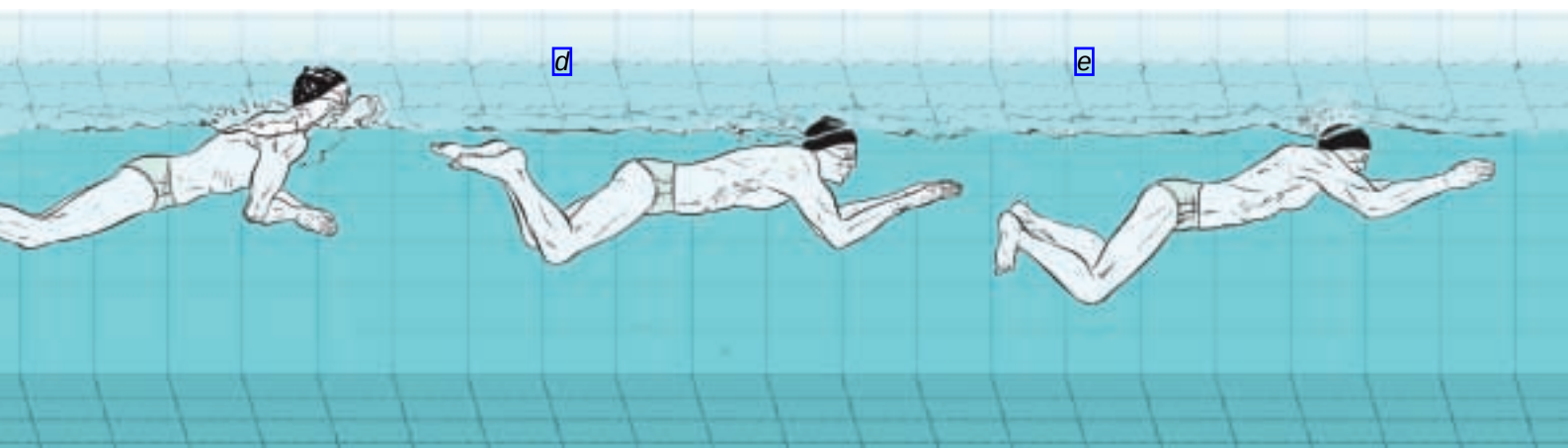


STANISLAS VANDERSTEDEN

Le brasseur belge Frédéric Deburghgraeve, médaillé d'or aux Jeux Olympiques d'Atlanta, détient le record du monde sur 100 mètres : il a parcouru cette distance en 1'00''60.



JEAN-LOUIS VIGORE



Astronomie

Les poètes et l'Univers

Anthologie dirigée par Jean-Pierre Luminet. Éditions du Cherche-midi, 1996.

Le Soleil, la Lune, le firmament et quelques astres comme Vénus, l'étoile du berger, figurent au magasin des accessoires de la poésie. Chacun se remémore quelques vers où sonnent des noms d'étoiles à côté d'invocations à l'astre des nuits. Les poètes sont-ils allés plus loin ? Ont-ils fait une place au vertige astronomique, voire cosmique, autrement que comme un élément de décor ?

Jean-Pierre Luminet, fort de sa double qualité d'astrophysicien et de

poète, a cherché dans la littérature poétique de tous les siècles et de quelques pays des textes inspirés tantôt par l'objet de l'astronomie, « l'espace qui s'étend au-dessus du ciel » (Platon, *Phèdre*, cité par l'auteur), tantôt par les représentations, images et concepts qu'a suscités la science astronomique. Il a ramené de son exploration une anthologie inattendue, riche, émouvante et propre à faire rêver. Elle fait la plus large part aux vers, mais ne néglige pas des fragments de prose dès qu'ils ont une qualité poétique qui déborde la narration ou l'explication.

Bien qu'il ne propose aucune typologie, il m'est apparu qu'on pouvait répartir ces textes en quatre catégories : les classiques, qui font appel aux astres immédiatement perceptibles comme à des objets de contemplation ou de méditation ; les didactiques, qui, cherchant à transmettre un savoir astronomique en enrobant la pilule supposée amère

de la science dans le sucre de la rhétorique, n'évitent pas toujours l'ennui qu'ils voudraient prévenir ; les lyriques, qui expriment l'effroi, l'émerveillement, l'interrogation provoqués par les élargissements d'horizon dus à l'astronomie ; les prophétiques, enfin, les plus rares, qui témoignent d'une intuition logique, ultérieurement validée par le travail scientifique, d'un aspect de la réalité cosmique.

De ces derniers, voici deux exemples. À qui s'interroge sur la nature de la Voie lactée, Manilius, dans la foulée de Démocrite, répond au I^{er} siècle, contre Aristote, qu'il s'agit d'un fourmillement d'étoiles. Aucun instrument d'optique ne permet alors de décider. Quinze siècles plus tard, alors que la technique fait toujours défaut, l'Écossais George Buchanan soutient la même thèse. Un demi-siècle encore, et la lunette de Galilée leur donne raison.

Le cas d'Edgar Poe est encore plus étonnant. Dans son long poème en prose, *Eurêka*, il résout le paradoxe d'Olbers : si l'Univers est infini dans l'espace et dans le temps, et s'il contient une infinité d'étoiles également dispersées, alors notre regard, où qu'il se porte, devrait rencontrer un astre et la voûte céleste être de nuit comme de jour aussi brillante que le Soleil. Poe, à la suite d'un pur raisonnement, propose que l'Univers n'est pas infini et qu'il a eu un début, si bien que la lumière de certains astres n'a pas encore eu le temps de nous parvenir.

De la surprise mélancolique due aux concepts de l'astronomie, on retiendra ces expressions de Lamartine, de Villiers de L'Isle Adam, de Leconte de Lisle, de Jean Richepin, entre autres, que nous percevons la lumière d'étoiles éteintes depuis, ce qui implique deux idées nullement intuitives : que la lumière a une vitesse finie et que les étoiles ont une durée de vie également finie. Ou la préfiguration inattendue d'un trou noir par Nerval le triste. D'entre les didactiques, je prie que soit sauvé l'extravagant René Ghil, qui vaut mieux que l'oubli où on le tient aujourd'hui et dont toute l'œuvre devrait être reconsidérée.

Quel usage les poètes font-ils de ces emprunts astronomiques ? Certains, s'en servant comme de métaphores, en tirent des considérations morales et métaphysiques sur la finitude de la vie humaine et sur l'impermanence de toutes choses. D'autres, comme Francis Ponge, en tirent la conclusion peu soutenable, toute de morosité réactionnaire, qu'on n'a rien inventé depuis les Anciens, *nil novi sub sole*, et que les astronomes ne font que répéter de



La personnalisation des astres est un des thèmes évoqués par les poètes.

vieilles lunes. Tout ceux-là ne parviennent pas à s'oublier eux-mêmes et exploitent en quelque sorte des concepts qu'ils ne pénètrent pas vraiment.

Les plus grands, à mes yeux, pas tous des plus célèbres, transmettent ce qui, dans leur regard, a changé du fait de l'astronomie. Voici ainsi Henri Michaux avouant : «C'est certain, jusqu'ici je n'avais pas vu, pas vraiment vu le ciel. J'y avais résisté, le regardant de l'autre bord, du bord du terrestre, du solide, de l'opposé.»

Une difficulté de rendre compte d'une telle anthologie, c'est qu'on voudrait tout citer, tout commenter, et que la tentation est ici à la mesure de la richesse : astronomique !

Une autre tentation du critique est de relever les lacunes de l'anthologiste. Ma culture est trop restreinte pour que je m'y risque. Mon goût m'aurait toutefois porté à inclure quelques vers du *Plein ciel* de Victor Hugo, que J.-P. Luminet a peut-être jugé trop connu. L'anthologiste ne s'est aventuré qu'aux limites de la science-fiction, avec Villiers et Dobzynski, écartant Jules Verne, Rosny Aîné, Maurice Renard et même le Flammarion d'*Uranie*, entre autres. Peut-être a-t-il eu raison, en ce sens que ce domaine qu'il n'ignore ni ne méprise mériterait une approche spécifique. Parmi les anciens, j'aurais bien vu, faisant pendant à Kepler et à Poe, la page de Kant suggérant que les nébuleuses sont des univers-îles et révélant la nature de notre Galaxie. Du côté des modernes, je serais surpris que Michel Butor, dans son abondante production poétique, n'ait pas fait usage d'images astronomiques. Signalons enfin que cette anthologie est très ethnocentrée sur la francophonie, représentant assez bien les mondes anglo-saxon et germanique, un peu les univers slave et latin, mais pas du tout le reste du monde, indien, arabe (Khayyam est persan), chinois ou japonais.

Cette remarque vise surtout à souligner que J.-P. Luminet a ouvert un chantier de recherches et qu'il n'a pas prétendu l'épuiser, bien au contraire. Ses présentations passionnantes et discrètes ne laissent pas entrevoir la dimension de son travail qui a dû être considérable, malgré l'existence de pionniers qu'il a le bon goût de citer. Dans cet ouvrage indispensable à tout rêveur de culture,

J.-P. Luminet relève d'anciens ponts par-dessus la fracture inacceptable qui sépare les sciences des lettres, où l'ignorance a fait son lit. On se prend à rêver qu'une Faculté de lettres songe à lui confier un enseignement spécialisé qui lui permettrait aussi de poursuivre sa recherche. Sans qu'il cesse pour autant d'avoir la tête dans les étoiles, ou bien dans les trous noirs.

Gérard KLEIN

Histoire des sciences

L'alchimie

Andrea Aromatico.
Éditions Gallimard (collection Découvertes), 1996.

Le thème se prête si bien à la réalisation d'un ouvrage dans la collection *Découvertes* que cette apparition un peu tardive surprend, mais ravit aussi. L'iconographie est plus somptueuse encore qu'on n'aurait pu l'espérer, avec des couleurs étincelantes. La mise en page se veut mise en scène : ici elle sert l'image pour la faire chatoyer ; là, elle en confronte d'autres,

les fait ressortir et, surtout, revivre. L'effort de documentation est prodigieux, et l'on applaudit le choix final.

Toutes ces figurations énigmatiques suscitent la curiosité, l'enthousiasme et incitent à la lecture : on a envie de comprendre le pourquoi de ces images bizarres et d'apprendre un peu de leur sens. Malheureusement le texte déçoit : non qu'il soit complètement indigent ou mal écrit, ce serait plutôt le contraire, mais il souscrit à une interprétation de l'alchimie comme révélation qui, pour être conventionnelle, n'en est pas moins usée, périmée.

Il reprend complaisamment les mythes les plus éculés, prenant «pour or comptant» la fable de Nicolas Flamel (une supercherie littéraire du début du XVII^e siècle, peut-être imputable à Bérolalde de Verville), celle de Basile Valentin (ce «moine» du XV^e siècle se nommait Johann Thölde et il publiait sous ce pseudonyme vers 1600) ou ressassant l'histoire de Fulcanelli qui, lui aussi, aurait découvert l'élixir de jouvence.

C'est l'approche ésotérique de l'alchimie, comme gnose. Le public en redemande, la vogue du livre de Paulo Coelho en témoigne (*L'alchimiste*, éditions A. Carrière). Le présent ouvrage témoigne même du retour en force du *Matin des magiciens*, dont on espérait enterrer l'illuminisme. On ne devinerait jamais, à la lecture d'A. Aromatico, que l'alchimie fut aussi proto-chimie !

Andrea Aromatico est italien ; c'est un symptôme : les études françaises



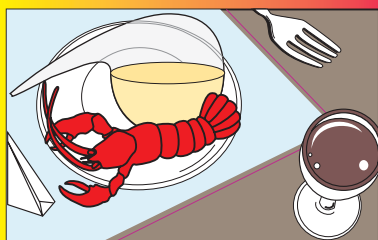
Table de dénomination des caractères hermétiques.

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 24 février 1997.

FRANCE

info

d'alchimie traversent une mauvaise passe, saignées par l'érudition pure, laquelle peut dessécher jusqu'à la stérilité. On ne peut se contenter de paraphraser les textes du XVI^e siècle ou du XVII^e, après en avoir éventuellement décelé l'antériorité dans ceux du XV^e. La seule attribution ne suffit pas : toute étude littéraire doit replacer son objet dans son contexte, pour expliquer la raison d'être d'une publication à sa date, et pour s'efforcer d'en retrouver le sens.

Une autre tare leste les études actuelles de l'alchimie : outre un positivisme borné d'établissement des sources, d'aucuns nient l'appartenance, pourtant bien établie, de l'alchimie aux sciences occultes. Ils se sont convaincus que manuscrits et livres transcrivent en clair un savoir avéré. Il n'y aurait d'obscurité que là où l'auteur ne savait plus et divaguait, parce que incapable de continuer à être précis. Cette apparence de bon sens va contre tous les codages, toutes les fréquentes manifestations de numérologie, de kabbale phonétique («laurier» : l'or y est) et autres obscurités dont les manuels alchimiques sont friands.

L'alchimie qu'on nous livre aujourd'hui proclame le rôle majeur de l'iconographie dans les textes alchimiques, qu'elle est censée, non pas illustrer (la notion moderne d'illustration est anachronique), mais aider à faire comprendre et à assimiler. Les images alchimiques ne forment pas un accompagnement passif et muet du texte : elles ont leur signification, souvent très riche («les illustrations des traités ont la garde des significations profondes, révélées à qui est disposé à les méditer longuement», écrit typiquement A. Aromatico). Certes, les fanatiques de l'écrit, dans leur logique imbécile (au sens étymologique : «refuser de voir»), leur dénie toute pertinence, sauf en écho au texte. Cette négation de tout rôle positif aux images est soit de l'aveuglement, soit de la paresse intellectuelle (éviter d'avoir à se donner des rudiments d'iconologie).

Je terminerai donc sur cinq propositions : (1) à la limite, un livre dépourvu de texte, tel que le *Mutus liber*, peut proposer, par le biais des seules images, un discours cohérent ; (2) l'iconographie d'un livre d'alchimie propose souvent son propre parcours, relativement autonome vis-à-vis de la seule lecture du texte, aidant à élucider celui-ci et à le rendre mémorable (c'est le cas de *L'Atalante fugitive*, de Michel Maier, en 1618) ; (3) un texte alchimique «illustré» peut livrer le sens caché des mots grâce à des images parlantes ; (4) les enluminures des planches alchimiques font

partie de l'histoire de l'art (chinois, musulman, occidental) et, donc, de notre culture ; (5) par conséquent, les outils de l'iconologie leur sont applicables, de manière particulièrement féconde.

Pierre LASZLO

Physique

L'énergie et la matière

Encyclopédie des jeunes Larousse, 1996.

L'énergie et la matière présente aux jeunes de la physique et de la chimie. L'ouvrage est composé de doubles pages largement illustrées d'images en couleurs et de schémas, réparties en trois parties : *L'énergie*, *Les constituants de la matière*, *La matière et les matériaux*.

Les images sont belles, sont-elles appropriées ? Et les textes sont-ils suffisamment didactiques et engageants pour susciter des vocations scientifiques ou, au moins, intéresser les jeunes ?

Faisons tout d'abord l'expérience de confier le livre à des enfants de huit à dix ans aimant les sciences : ils sont heureux, surtout parce que les images leur conviennent ; ils retrouvent des phénomènes qui les intriguent. Que pensent-ils du texte ? L'enquête étant plus difficile à mener, reprenons-leur le livre un instant et ouvrons-le au hasard à la double page «Les états de la matière». L'image d'ouverture représente le versement d'azote liquide dans un récipient : nul doute qu'elle ne symbolise bien le sujet... mais elle n'est accompagnée d'aucune légende explicative ! En dessous, une liste de termes expliqués : «condensation : passage d'un corps de l'état gazeux à l'état solide». Ça continue vraiment mal ! Puis : «corps amorphe : corps solide, composé de particules qui ne sont pas disposées de façon ordonnée». Des particules, diantre ! Dans un livre qui évoque la matière, la particule a plutôt une connotation subatomique qui risque d'égarer les jeunes.

Refroidis par cette entrée en matière, «zappons» à la double page consacrée aux solutions aqueuses. Nous y voyons, en image d'ouverture, une sorte de tableau abstrait légendé «L'eau courante dans la nature» ; l'image ne montre ni vraiment l'eau, ni vraiment la nature, mais admettons que le flou du mouvement représenté

SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06

POUR LA SCIENCE Directeur : Philippe Boulanger. Rédaction : Philippe Boulanger (Rédacteur en chef), Hervé This (Rédacteur en chef adjoint), Françoise Cinotti (Rédactrice - Secrétaire générale de la rédaction), Bénédicte Leclercq, Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot. Secrétariat de Rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Merviel. Direction financière : Pierre Lecomte. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Savin. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Paloma Cabeza-Orcel, Raymond Campan, Bernard Chauvet, Bettina Debû, Paul Decaix, Pierrick Gaudry, Marie-Thérèse Landousy, Philippe Machetel, Claude Olivier, Guy Paulus, Isabelle Sailot, Édouard Sauvignon, Jean Schneider, Stéphane Udry, Jean-Marc Vian.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, John Horgan, Kristin Leutwyler, Philip Morrison, Madhusree Mukerjee, Sacha Nemecek, Corey Powell, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Paul Wallich, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher : John Moeling. Chairman and Chief Executive Officer : John Hanley. Corporate Officers : John Moeling, Robert Biewen, Anthony Degutus.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. (1) 46 34 21 42.

Télex : LIBELIN 202978F.

Télécopieur : 43 25 18 29

Étranger : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP
Henri Gibelin.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : Modulo - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H2 Canada

Suisse : GM Diffusion - Rue d'Etraz, 2 - CH 1027 Lonay

Autres pays : Éditions Belin - B.P. 205, 75264 Paris Cedex 06.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris).

Nos lecteurs trouveront, en pages, centrales, un encart publicitaire Encyclopaedia Universalis et, en pages 18A, 18B, 98A et 98B, des bulletins d'abonnement.

(volontairement?) soit à l'origine de la difficulté. Il reste qu'on digérera plus difficilement la photographie légendée «Cette solution est saturée. Le sel ne se dissout plus, il se dépose» : l'image représente un tube à essai, où un cristal blanchâtre se trouve au fond d'un liquide rouge. Le sel serait-il rouge ? Certains sels le sont, mais pas celui que nous mangeons, le chlorure de sodium.

Cette fois, ne nous arrêtons pas, et lisons le texte : «L'eau dissout de nombreuses substances solides, liquides ou gazeuses. Cette remarquable capacité est utilisée dans de nombreux procédés industriels pour fabriquer des produits nouveaux. Au cours de ces fabrications, le chimiste est souvent obligé de faire varier les caractéristiques des produits mis en solution pour les adapter à la diversité des procédés techniques.»

Lisez bien ce paragraphe et demandez-vous, en votre âme et conscience, si un jeune sera passionné par la science quand il découvrira un tel texte : qu'aura-t-il appris ? quel outil intellectuel nouveau lui permettra-t-il de mieux comprendre le monde ?

LOUIS RICHERT

Entomologie

Les illustrations entomologiques

J. d'Aguilar, R. Courtin, A. Fraval, R. Guilbot et C. Villemant.
Éditions de l'INRA, 1996.

La persistance de l'art de l'illustrateur dans le domaine des sciences naturelles étonne parfois. Pourquoi les ouvrages de détermination des plantes ou des animaux ne sont-ils pas illustrés par des photographies, plutôt que par des dessins ? Les photographies ne seraient-elles pas plus exactes et moins soumises aux interprétations des artistes ?

Poser ces questions, c'est oublier le rôle de la lumière, grande maîtresse des illusions. Jamais, dans la nature, on ne voit deux fois de la même manière le même papillon ou le même oiseau. Éclairés par-derrière, de côté, par-dessous ou par-dessus, par la faible lueur du jour naissant ou par l'éclat d'un coucher de soleil, les animaux changent de couleur, de taille, de forme. Notre œil est berné, et l'objectif photographique se laisse également abuser.



La cicadelle verte, vue par F. Pétré.

Le dessin, et singulièrement le dessin en noir et blanc, échappe à ces mystifications. Si la lumière y est présente, elle est asservie et nous facilite la perception des volumes sans apporter de déformation. Cela ne rejette pas toute utilisation de la photographie, surtout de celle effectuée dans le milieu naturel, et cela n'inclut aucune référence à l'aspect esthétique.

En restant strictement sur le terrain de l'information, je pense que la photographie nous montre ce que nous pouvons voir ; le dessin, ce que nous devons voir. Mais force est de reconnaître que ce travail d'information précis et exact est loin d'être dépourvu d'aspect esthétique. Il suffit de feuilleter le livre aujourd'hui publié par l'INRA pour en être convaincu, et les mots ne vaudront jamais pour le dire ce qu'apporte le regard.

On pourrait aussi, si cela n'avait pas été si souvent tenté, se poser des questions sur les causes de cette extraordinaire profusion de formes rencontrées chez les insectes. Enfin, par rapport aux 750 000 espèces différentes connues, la petite centaine d'insectes qui nous est présentée ne représente, bien entendu, qu'un très petit échantillon de cette diversité que nous aurons peut-être envie d'aller contempler dans la nature. Par conséquent, il serait heureux que nous nous sentions concernés par la protection des insectes et de leurs milieux.

Remercions l'INRA de nous permettre cette enrichissante rencontre, même si nous pouvons regretter que la qualité de l'édition ne soit pas totalement à la hauteur du grand talent des illustrateurs.

Jacques LECOMTE