

The background of the entire cover is a light blue surface with several playing cards scattered across it. Visible cards include the King of Spades, the Queen of Diamonds, the King of Hearts, and the Queen of Clubs. The cards are slightly overlapping and tilted at various angles.

■ POUR LA **SCIENCE**

Mai 1996

édition française de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

MALNUTRITION
ET DÉVELOPPEMENT

L'URBANISME AU BRÉSIL

LA TÉLÉCHIRURGIE

LE SIDA EN AFRIQUE

LE BOURGEONNEMENT
DES VÉSICULES

LA PHOTORECONNAISSANCE

LES ÉLECTRONS
À DEUX DIMENSIONS

LES MANGROVES

LUMIÈRE ET TROUS NOIRS

JEU DE CARTES BIFACES

Canada : \$ 8,75

Bloc-notes de Didier Nordon

Tribune des lecteurs

Jeu-concours : Numérologie

Les impossibles de l'agronomie

par Guy Paillotin



Présence de l'histoire

Histoire de l'arc-en-ciel

par Jean-Louis Ricard

Science et gastronomie

Fraîches couleurs

Perspectives scientifiques :

Une armée de métier adaptable

Sont-ils bien morts?

Un gaz d'humains

Le parfum sur la peau

Production en série

L'éruption du Pinatubo

Crapauds droitiers

La maladie de Creutzfeldt-Jacob

Courir sur l'eau

Dynamo céleste

La fontaine d'atomes

π , e^π et $\Gamma(1/4)$

La végétation par satellite

L'image du mois

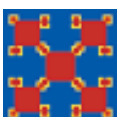
Flottements, par Jacques Ninio



Logique et calcul

Jeux avec des cartes bifaces

par Jean-Paul Delahaye



Visions mathématiques

Mots croisés et anagrammes

par Bernard Iqueaux



Analyses de livres

– *De la chimie des hormones*, par Carl Djerassi

– *Bain de science*, par Sven Ortoli

et Nicolas Witkowski

– *L'autorité de la science*, par François Lurçat

– *Turbulence*, par Uriel Frisch

5

6

7

8

12

14

16

17

20

21

22

23

23

24

25

26

27

28

29

96

100

106

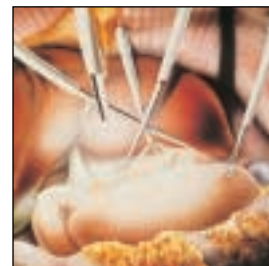
110

La vidéo-chirurgie

32

par François Dubois

Aujourd'hui, les chirurgiens introduisent par de petites incisions les instruments miniaturisés grâce auxquels ils pratiquent les opérations qui nécessitaient de larges ouvertures, douloureuses et difficiles à cicatriser.



Lumière et trous noirs

40

par Norbert Quien, Rainer Wehrse et Christoph Kindl

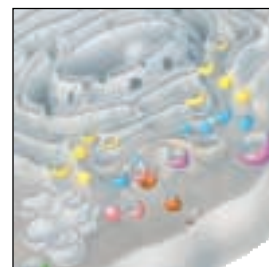
L'exemple d'un disque de matière qui tourne autour d'un trou noir illustre l'effet d'un fort champ de gravitation sur la propagation de la lumière. Des simulations sur ordinateur font apparaître comment les images se déforment et se multiplient.



Vésicules et trafic intracellulaire 48

par James Rothman et Lelio Orci

Une collaboration transatlantique découvre la machinerie qui assure la formation des vésicules, ces conteneurs minuscules et indispensables qui stockent des protéines, puis les transportent là où elles sont nécessaires dans la cellule.

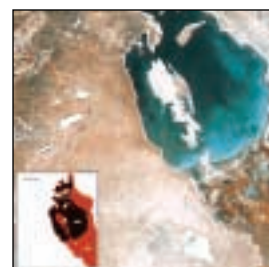


La reconnaissance aérienne

56

par Dino Brugioni

Dans les années 1950 et 1960, en pleine guerre froide, les services d'espionnage des deux camps surveillaient la planète en la photographiant par avion ou par satellite. La difficile interprétation des images obtenues eut un certain impact sur les relations internationales.

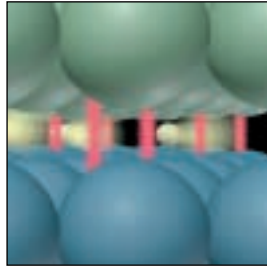


Les électrons dans un monde à deux dimensions

64

par Steven Kivelson,
Dung-Hai Lee
et Shou-Cheng Zhang

Confinés dans un plan, les électrons sont les sujets de l'effet Hall quantique, phénomène relié à la supraconduction.



Les mangroves des Caraïbes

70

par Klaus Rützler
et Ilka Feller

Des plantes et des animaux se sont adaptés pour vivre à la limite entre la terre et la mer. Ils forment un écosystème diversifié, fragile et surprenant.



L'épidémie de SIDA en Afrique

76

par John Caldwell
et Pat Caldwell

Dans certaines régions de l'Afrique subsaharienne, près d'une personne sur quatre est séropositive. L'absence de circoncision serait-elle responsable de la gravité de l'épidémie dans ces régions?



L'urbanisme de Curitiba

84

par Jonas Rabinovitch
et Josef Leitman

Une cité brésilienne en expansion a préservé la qualité de la vie de ses habitants grâce à des solutions peu coûteuses.

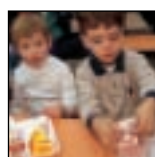


Malnutrition, pauvreté et développement intellectuel

90

par Larry Brown et Ernesto Pollitt

La malnutrition infantile perturbe à la fois le comportement des enfants et leur santé physique. Elle amoindrit en outre durablement les capacités intellectuelles.



Épiménides rédactionnels

La ferme des étoiles est une tentation culturelle. Cette ferme gersoise (32380 Mauroux), posée sur une colline, couverte de vigne vierge, propose aux visiteurs, qu'elle espère nombreux, le confort simple d'une vieille demeure de campagne, la chaleur du feu dans une grande cheminée, la fraîcheur du parc quand le soleil écrase la campagne environnante, une piscine et des veillées aux étoiles.

Elle a invité les journalistes scientifiques à s'associer à la contemplation du ciel, à pincer les cordes d'un luth ragaillard par le site, à dialoguer avec les invités pour qu'ils découvrent ensemble les beautés des étoiles, à disserter sur les caractéristiques géométriques des trous noirs (voir *Lumière et trous noirs*, par Norbert Quien, Rainer Wehrse et Christoph Kindl, page 40), à réfléchir sur les destinées des galaxies et aux périples planétaires, le tout en musique, s'il vous plaît.

Hélas mon éducation folliculaire est datée. La rédaction d'un journal de vulgarisation scientifique doit, m'a-t-on appris, être vertueuse en ce qui concerne les voyages de presse et autres invitations. Ces faveurs incitent les journalistes à des remerciements appuyés qui évitent aux firmes commerciales l'achat de publicité, autrement dispendieuse pour les uns et rémunératrice pour les autres.

Même si l'honorabilité du rédacteur souffrait quelques violences rationalisables, que doit faire le journaliste s'il n'a aucun espoir, faute de rubrique appropriée, de placer un article vantant les mérites des réalisations de son hôte? Doit-il refuser, en pensant que la puissance invitante connaît cette impossibilité et que sa générosité sans arrière-pensée en a conscience?

Le problème du rédactionnel (bel euphémisme) est là tout entier dans sa douloureuse ambiguïté. Aussi j'ai refusé l'invitation de *La ferme aux étoiles* (tél : 62 66 46 83) et je n'en parlerai pas plus.

Philippe BOULANGER

Tu quoque, fili !

Depuis Athéna, fille de Zeus, jusqu'au chanteur Carlos, fils de la psychanalyste Françoise Dolto, les enfants de personnages illustres deviennent souvent eux-mêmes illustres. Quitte, s'ils manquent d'indépendance vis-à-vis de leurs parents, à labourer les mêmes champs : ainsi les Bernoulli, mathématiciens de pères en fils et d'oncles en neveux, ou les Dumas, Alexandre de père en fils.

Ce phénomène, qui a longtemps intrigué, est désormais éclairci : la célébrité est d'origine génétique. Une équipe de chercheurs de l'Université d'Hollywood vient de mettre en évidence le gène de la célébrité. Être porteur de ce gène augmente d'un facteur dix les chances de devenir célèbre. Ainsi, contrairement à la stérilité, la célébrité est héréditaire.

Kulturkampf

À croire leurs prospectus, certaines stations de sports d'hiver disposent de «neige de culture». Cette expression, plus jolie que le brutal «canon à neige», désigne sans doute la même chose, ou presque. Elle est plus juste. Tout ce qui n'est point nature est culture, et tout ce qui n'est point culture est nature. Quand Dame Nature est défaillante dans ses distributions de neige, c'est à la culture de prendre la relève... Naturellement !

Les stations de ski devraient faire école, tant leur vocabulaire regorge d'euphémismes heureux. On ne dirait pas «effectuer un essai nucléaire», mais «procéder à une explosion de culture», ni «assassiner quelqu'un», mais «lui faire don d'une mort culturelle». Et puis, si certains enfants sont naturels, les autres

sont donc culturels : plaisante harmonie. Quant à notre santé, plus besoin de nous précipiter sur les produits naturels. Les colorants et autres agents de sapidité n'ont plus rien d'inquiétant si on leur donne le nom, qui leur revient de droit, d'«aliments culturels». Mangeons sans autre souci qu'un juste équilibre entre aliments naturels et culturels.

Comment vas-tuyau de poêle ?

Maladie : mal a dit. Mais que veut donc dire le mal ? Le médecin va-t-il œuvrer pour soi-même, c'est-à-dire se contenter de supprimer le symptôme en niant le message du soi, ou pour gai-rire, faire retrouver le rire gai et la joie de vivre ?

Si ces lignes se voulaient humoristiques, on dirait : bravo, bien trouvé ! Mais elles sont extraites d'un livre sérieux, publié dans une collection intitulée «La science du 3^e millénaire» (Luc Bigé, *L'homme réuni-fié*, éditions du Rocher, 1995). Alors, n'en disons rien.

Égocentrisme co(s)mique

Les intellectuels parisiens ne prennent au sérieux que les intellectuels parisiens, les ivrognes bordelais ne connaissent d'autre vin que le bordeaux. Les uns comme les autres se croient au centre du monde... Hé bien, ils ont raison !

En quatrième de couverture d'un essai non dénué d'une certaine ambition, on lit que l'humanité est à mi-chemin, ce qui est un moment propice pour établir un bilan. La vie en effet a commencé voici environ quatre milliards d'années, et devrait en durer encore six avant que les condi-

tions ne la rendent impossible. Pour une fois, ce désir d'être le centre est altruiste. Depuis le singe qui nous a donné naissance jusqu'au robot qui nous enterrera, sans omettre les intellectuels bordelais ni les ivrognes parisiens, tout le monde, à quelques millions d'années près (bagatelle), peut partager la fierté d'être au milieu du temps. Imaginons de plus qu'on montre un jour que l'Univers est infini. En ce cas, nous pourrions nous flatter d'être au centre à la fois du temps et de l'espace. C'est beau, la science.

Usage du faux

Ceux qui accablent notre époque en évaluant le style du dernier roman («nul») à l'aune du classicisme, oublient une chose : l'âge classique ne se réduit pas aux quelques auteurs dont nous avons retenu les noms. Notre siècle n'est pas plus dégénéré qu'un autre, et nous sommes tous capables d'écrire aussi mal que Pierre-Sylvain Régis (1632-1707) : «Puis que l'erreur n'est autre chose, que le mauvais usage que l'ame fait du jugement, et que l'ame n'use mal du jugement qu'entant qu'elle suppose dans les objets de ses idées, des propriétés et des rapports qui n'y sont pas, ou qu'elle retranche ceux qui y sont ; il ne reste plus pour éviter l'erreur, qu'à découvrir, quelles sont les causes qui portent l'ame à faire ces suppositions, ou ces retranchemens» (*L'usage de la raison et de la foi*, réédition Fayard, 1996).

Nous n'écrivons pas plus mal que Régis, mais pensons-nous mieux ? Il faut croire que non. Un livre de Massimo Piattelli Palmarini intitulé *La réforme du jugement ou Comment ne plus se tromper* (éditions Odile Jacob, 1995) vient de paraître. Ainsi, Régis avait trouvé un truc pour ne jamais se tromper, mais, sots que nous sommes, nous l'avons perdu, forçant un nouvel auteur à découvrir et nous livrer le sien. Il est vrai que, pour Régis, ne plus se tromper, c'est avoir la foi, alors que, pour Palmarini, c'est éviter les pièges tendus par les affirmations pseudo-scientifiques. L'erreur de l'un n'est pas l'erreur de l'autre – ni même sa vérité !

L'éventail des erreurs possibles grandit aussi vite que nos moyens de les éviter. Des livres pour déjouer les erreurs, il en paraîtra jusqu'à la fin des temps. Même s'ils ne sont pas faux, épargneront-ils une seule erreur à un seul être humain ?

Modélisme

Modèle. Dans la bouche du peintre, ce mot désigne la personne ou l'objet dont il s'inspire ; dans celle du physicien, il désigne la théorie élaborée pour rendre compte d'un phénomène. Ainsi, dans le premier cas, le modèle est la réalité ; dans le second, c'est une abstraction qui vise à exprimer l'essence d'une réalité dont il ne fait pas partie. Le peintre part du modèle pour arriver à l'œuvre ; le physicien part de la réalité pour arriver au modèle.

Les optimistes (ou les paresseux) diront : rien là de préoccupant. L'occurrence d'un même mot dans des sens différents n'est pas plus signifiante que, par exemple, le fait que la ville de Vienne ne soit pas dans le département de la Vienne. Mais les inquiets prendront au sérieux cette bifurcation du mot modèle vers deux acceptions opposées. Elle laisse entrevoir que les rapports entre arts et sciences ne seront jamais simples – pas plus d'ailleurs que les rapports entre arts et réalité, ou ceux entre sciences et réalité. Bref, l'homme n'est pas près d'avoir une perception satisfaisante de la réalité.

À quoi servent les vieux?

Un contradicteur de Richard Dawkins objecte à sa théorie que la survie des sujets âgés n'aurait pas d'intérêt pour la sélection des gènes (voir *La loi des gènes*, *Pour la Science*, janvier 1996 et *Tribune des lecteurs*, *Pour la Science*, mars 1996). On a parfois mis en avant l'idée que la sélection naturelle a «mis au point» des organismes résistants et ne s'est pas souciée de les éliminer dès qu'ils ont dépassé l'âge de la procréation. Toutefois chaque espèce semble avoir un âge limite indépassable : la sélection naturelle a probablement institué une limite programmée. Pourquoi alors un délai si long entre la fin de la période de procréation et la limite ultime?

La présence de sujets âgés, qui ne se reproduisent plus, mais qui ont acquis une expérience, introduit d'abord une concurrence intraspécifique qui conduit à l'élimination des jeunes, futurs ou actuels reproducteurs, les moins performants, à l'élévation rapide de l'efficacité de l'espèce et donc au succès des gènes des survivants. Dans un milieu où les ressources sont rares, les plus jeunes, livrés à eux-mêmes, doivent se montrer en moyenne au moins aussi astucieux que les sujets âgés, qui survivent malgré des moyens diminués, pour survivre et avoir l'occasion de se reproduire. Comme cette compétition se retrouve à chaque génération, l'accélération de la sélection est considérable : il est de l'intérêt de l'espèce que les sujets âgés vivent de plus en plus vieux et accumulent de plus en plus d'expérience.

Ensuite, la présence de sujets âgés actifs dans un groupe peut faciliter la protection et, plus encore, l'apprentissage des sujets jeunes. Les groupes qui comportent des sujets âgés ont donc un avantage sélectif. Cette sélection inter-groupes n'est que superficiellement contradictoire avec la sélection intra-groupe décrite précédemment, puisqu'elles ne s'exercent pas en même temps dans l'histoire d'une espèce.

Cette réponse est rarement évoquée, parce qu'elle soulève une difficulté majeure. La théorie de la sélection naturelle suppose une concurrence entre des individus. L'idée qui vient d'être résumée suppose, elle, une concurrence à deux étages, d'une part entre les individus, d'autre part entre des groupes. En effet, les groupes comptant des sujets marginalement plus âgés étant soumis à une plus forte compétition interne réussissent mieux que les groupes dépourvus

de sujets âgés et finissent par les éliminer. La sélection à la fois entre individus et entre groupes se poursuit jusqu'à ce qu'un équilibre soit trouvé entre les avantages de la présence de sujets âgés.

Les spécialistes de l'évolution rejettent en général l'idée d'une telle sélection entre groupes, et ils ont, en général, raison. Mais certains mammifères supérieurs et, en particulier, les ancêtres de l'homme, vivent en bandes qui manifestent une certaine endogamie. Un processus de sélection peut intervenir entre ces bandes qui conservent, du point de vue de leur patrimoine génétique, une continuité marginale, mais décisive sur la longue période et qui constituent, en quelque sorte, des superindividus. Les lignées de bandes qui comportent des vieillards ont un avantage sélectif sur celles qui n'en comptent pas, si bien que celles où l'on ne vit pas vieux finissent par être éliminées.

Cette hypothèse peut être testée. Elle implique qu'il y a une corrélation entre la capacité des individus d'une espèce à vivre vieux et leur capacité à se distribuer en groupes concurrents à l'intérieur desquels se maintient une certaine continuité génétique.

Gérard KLEIN, Paris

Le schtroumpf des mots

En éliminant les mots grammaticaux de la première phrase de l'article de Jean Senellart, *Le sens des mots* (voir *Pour la Science*, mars 1996), on obtient : «mots phrase pas même importance pour compréhension». Pour reconstruire le sens, on peut proposer plusieurs solutions, qui donnent un caractère général ou particulier à l'affirmation. Est-ce à dire que cet ensemble de mots est compréhensible? L'interprétation est, il est vrai, moins ouverte que pour l'ensemble «tous les mots de cette phrase n'ont pas la même importance pour sa». Ainsi compréhensible signifie que les hypothèses d'interprétation sont peu nombreuses, qu'elles définissent des sens proches et que le choix arbitraire de l'une d'entre elles n'est pas source de méprise.

Toutefois, l'exemple n'est pas tout à fait général. Les Schtroumpfs, petits bonshommes bleus créés par le dessinateur Peyo, le savent bien. Ils construisent leur langue à partir du français avec quelques règles de sémantique et de pragmatique telles que : «remplace toutes les expressions de la langue de base par *schtroumpf* quand tu peux le faire sans créer une ambiguïté excessive».

Le mot *schtroumpf* ne remplace que des noms (propres ou communs), des verbes ou des adverbess, ces mots que Jean Senellart nomme «pleins». La phrase «tous les mots de cette phrase n'ont pas la même importance pour sa *schtroumpf*» n'en reste pas moins énigmatique. Le contexte ne m'aide pas à lever l'ambiguïté. Il y a en plus du contexte un ensemble de «messages types déjà hypercodifiés», comme l'a noté Umberto Eco dans un article de 1979 sur la langue des Schtroumpfs, que je ne maîtrise pas. Ce domaine est hors de ma compétence encyclopédique, le champ de connaissances auquel je fais sans cesse appel pour en dériver des informations intertextuelles.

Ainsi les mots pleins ne peuvent se définir par leur caractère indispensable pour la conservation du sens. Dans tous les cas, le texte requiert une coopération active dans l'interprétation de la part du destinataire pour connecter l'ensemble avec des éléments de l'encyclopédie, et il est possible, pour des raisons d'économie, de ne pas utiliser certains mots pleins et de les remplacer par ce qui pourrait être un mot creux : le mot *schtroumpf*. Pourrait-on trouver une meilleure définition de «mot plein» que la suivante «est plein, tout mot qui n'est pas grammatical»? Alexandre SIBERT, Lyon

Réponse de Jean Senellart

Nous définissons les mots grammaticaux à partir d'une analyse statistique, à la différence des linguistes qui les définissent à partir de leurs fonctions grammaticales. Bien que la plupart des mots grammaticaux au sens linguistique le soient aussi au sens statistique, et réciproquement, les deux notions sont bien distinctes. Par définition aussi, pour nous, les mots pleins sont les mots qui ne sont pas grammaticaux. La définition statistique est compatible avec les connaissances encyclopédiques que nous utilisons, puisqu'elle repose sur l'analyse d'un corpus encyclopédique. Ainsi, avec notre définition, le mot *ministre*, dans un contexte politique, ou le mot *taureau*, dans un texte qui ne traite pas des bovins, mais contient l'expression «prendre le taureau par les cornes», sont grammaticaux. N'est-il pas étonnant que ces deux mots soient justement remplaçables par *schtroumpf*?

Adressez à *Pour la Science* vos remarques, vos commentaires, vos réflexions sur l'actualité scientifique et vos relations avec la science, sur Internet, à l'adresse 101641.3525@compuserve.com en indiquant *Tribune des lecteurs* dans la rubrique objet.

JEU-CONCOURS

PIERRE TOUGNE N°23

NUMÉROLOGIE

Pour le jeu-concours de ce mois-ci, voici deux petits problèmes de «numérologie». Tout nombre entier se terminant par zéro a son carré qui se termine par 00, c'est-à-dire deux chiffres identiques. Sauriez-vous caractériser tous les nombres entiers décimaux dont le carré se termine par deux chiffres identiques ?

Si l'ordre naturel des nombres entiers nous est familier, l'ordre alphabétique de ces mêmes nombres l'est beaucoup moins. Ainsi 100 est le premier nombre par ordre alphabétique, c'est aussi, dans cette classification, le pre-

mier nombre pair ou le premier carré entier. Pour le premier nombre impair, il faut aller chercher plus loin: cent billions cinq (100 000 000 000 005)! À ce sujet, quel est le premier cube entier par ordre alphabétique ?

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 mai 1996, dix gagnants tirés au sort recevront le livre *Le calcul intensif*, Bibliothèque Pour la Science.

LISTE ALPHABÉTIQUE DES ENTIERS DE 1 À 1 000, EN FRANCAIS

CENT, CENT CINQ, CENT CINQUANTE, CENT CINQUANTE CINQ, CENT CINQUANTE DEUX,ZÉRO.

LISTE ALPHABÉTIQUE DES ENTIERS DE 1 À 1 000, EN CHIFFRES ROMAINS

C CC CCC CCCI CCCII CCCIII XXXVIII

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N°21

Nombreux sont les lecteurs qui ont déjoué le stratagème imaginé par le conservateur de la bibliothèque. Pour trouver le code, il suffisait de remarquer que :

a) Aux permutations circulaires près, il n'y a que quatre états de départ 0011, 0101, 0111, 1000.

b) Agir sur deux interrupteurs adjacents ou diagonaux ne modifie pas la parité du nombre de 1 ou de 0, c'est-à-dire que les états 0011 et 0101 se transformeront en eux-mêmes ou la porte s'ouvrira tandis que les états 0111, 1000 s'échangeront ou resteront les mêmes.

c) Agir sur un seul interrupteur transforme les états 0111 et 1000 dans les états 0011 ou 0101 ou bien la porte s'ouvre.

Dès lors, la stratégie était la suivante : si l'état de départ est l'un des états 0011 ou 0101, la suite D2A2D2 ouvrira à coup sûr la porte. Si ce n'est pas le cas, on sait que l'on est dans un état 0111 ou 1000, auquel cas A1 ou D1 soit ouvrira la porte, soit nous mettra dans un état 0011 ou 0101 et l'on est ramené à la situation de départ. Le code d'accès était donc :

D2A2D2 (A1 ou D1) D2A2D2

Les impossibles de l'agronomie

GUY PAILLOTIN

Les avantages des progrès de l'agriculture sont diversement mesurés en fonction de la richesse des pays. La gestion de la Terre, village agricole global, est à inventer.

Il y a 10 000 ans, au Néolithique, les hommes du Proche-Orient inventaient simultanément l'agriculture et l'élevage. Cette révolution verte allait conquérir le monde. Parallèlement, les meilleurs rendements à l'hectare des cultures et les conditions plus douces de la vie sédentaire augmentaient la population du Globe, et, dans une certaine mesure, amenaient le problème actuel : le surcroît de population contrecarre-t-il le confort apporté par une meilleure exploitation du sol ?

Où en sommes-nous aujourd'hui ? Nos ressources alimentaires sont-elles suffisantes ? Sont-elles renouvelables ? Est-il possible d'éliminer les pestes, insectes et champignons qui pénalisent les cultures ? Est-il définitivement impossible de pratiquer l'agriculture dans certaines régions du Globe ? Une des causes de la Révolution française a été les grandes famines qui ont frappé la France sous l'Ancien régime. Pouvons-nous pallier les écarts climatiques et de quelle façon ?

Est-il possible d'extraire des produits végétaux et animaux, des éléments chimiques élaborés dont la synthèse est difficile et coûteuse ? La chimie verte a-t-elle un avenir, ou sommes-nous définitivement condamnés à tout extraire du pétrole ? Enfin, pouvons-nous nourrir le monde ?

LA FAIM DU MONDE

Huit cent millions de personnes sur les six milliards cinq cent mille habitants de la Terre souffrent de la faim alors que la production agricole dans le monde permettrait de distribuer à chaque habitant du Globe une ration journalière suffisante de 2 700 calories. Il n'y a pas d'impossibilité physique à nourrir le monde, il y a de douloureuses réalités économiques qui sont faites d'inégalités. La croissance

démographique est de 1,6 pour cent en moyenne ; elle est un peu plus élevée, 1,9 pour cent, dans les pays en développement, ce qui fait 100 millions d'habitants en plus par an. La croissance du PNB est de trois à quatre pour cent, donc il y a des chances pour que le chiffre de 800 millions diminue encore. La difficulté n'est pas technique, elle est économique.

Il reste paradoxalement douloureux que des terres soient mises en jachère dans les pays développés et que les habitants des pays pauvres souffrent de malnutrition. Le problème est de savoir si les progrès de l'agriculture s'appliqueront aux cultures adéquates, et si l'augmentation des volumes produits ne renforcera pas les disparités ; la question pèse à la fois sur les relations pays industrialisés-pays en développement, et sur le fonctionnement des sociétés industrielles.

LA GESTION DES RESSOURCES

Cela étant, il est impossible que les ressources du Globe soient indéfiniment renouvelables ; toutefois, si elles étaient suffisantes pendant la durée de l'existence de la Terre, cette limitation ne serait pas très contraignante.

Trois paramètres sont à l'ordre du jour : la biodiversité, les ressources en eau et les ressources des sols.

La biodiversité c'est la variabilité génétique : si elle diminuait trop, notre capacité d'adaptation serait réduite. Le risque n'est pas aussi fort qu'on le dit, mais la vigilance s'impose, notamment pour les espèces céréalières.

Les sols et l'eau sont plus difficiles à gérer. Les surfaces cultivables sont inégalement réparties : aux États-Unis ou en Australie, il y a un hectare ou plus de sols cultivables par habitant, en France un tiers d'hectare et dans certains pays moins

d'un dixième d'hectare. De plus, ces disponibilités peuvent être dégradées par l'érosion ou la surexploitation dans les pays pauvres. Enfin l'inégalité des ressources en eau est encore plus marquée : certains pays comme Israël et l'Égypte consomment aujourd'hui 100 pour cent de l'eau renouvelable recueillie (20 pour cent en France).

La gestion de l'eau est très complexe, et les biologistes tentent de mettre au point des plantes moins consommatrices d'eau ou qui acceptent des eaux de moindre qualité, c'est-à-dire des eaux usées ou un peu salées. Là encore, le facteur économique est prépondérant : avec de l'énergie, on peut tout faire, même des sols artificiels, mais à un coût rédhibitoire. Un impossible économique actuel est de dessaler l'eau de mer pour l'irrigation des cultures.

On a longtemps fondé quelques espoirs sur les ressources alimentaires océaniques. Hélas la plupart des mers sont aujourd'hui surexploitées, et les marins pêcheurs sont malheureusement obligés d'aller de plus en plus loin des côtes pour capturer leur prise. La rarefaction des ressources océaniques est une réalité et il faudrait y pallier.

LA LUTTE CONTRE LES GRANDS FLÉAUX

La lutte contre les grands fléaux est aujourd'hui plus efficace. Il y a deux ans, on s'est inquiété, non sans raison, de pullulations de criquets en Afrique. De temps en temps, dans des conditions climatiques favorables, un grand nombre de criquets éclosent : quand ces criquets se concentrent sur un territoire, ils changent de comportement et deviennent grégaires et dévorent les cultures.

La lutte chimique est assortie d'une veille attentive pour intervenir le plus vite possible, avant la grégarisation. Des réseaux d'observations existent, animés notamment par une équipe du CIRAD, à Montpellier, des processus d'alerte et de lutte chimique sont en place. Cependant des progrès restent à faire dans la spécificité de la nocivité et l'on recherche constamment des molécules moins nocives pour l'homme. Ces progrès souhaités passent par une meilleure connaissance de la biologie animale, la caractérisation des hormones de développement du criquet par exemple.

Toutefois, l'évolution a conféré aux insectes une forte capacité de résistance génétique à des substances toxiques et la lutte est délicate : la dissémination d'un poison crée, par pression de sélection, une population

résistante. Il y a toujours une course entre le glaive et le bouclier et les moyens de lutte sont perpétuellement affinés. Le glaive, c'est la lutte chimique : on cherche des molécules de plus en plus spécifiques qui n'attaquent que les insectes et puis des insectes spécifiquement redoutables.

On cherche aussi des molécules, surtout pour les maladies bactériennes, qui puissent activer les défenses des plantes : c'est le bouclier. La lutte biologique englobe aussi l'utilisation de toxines biologiques, le renforcement de l'acti-

vité des prédateurs – on a mis au point une espèce qui mange les œufs d'une espèce qui attaque le maïs – et la dissémination d'insectes stériles ou anormaux. Enfin la lutte génétique consiste à sélectionner les plantes qui ont développé une résistance aux insectes ou à transférer des gènes de résistance aux insectes.

On a pensé à des champs-pièges qui concentreraient les pestes ; malheureusement les nuisibles se déplacent des champs pièges aux champs cultivés... Les tas de bois qui pourrissent en forêt

sont ainsi d'excellents réservoirs d'insectes. Un piège actuel, plus élaboré, permet d'attirer les insectes par des phéromones sexuelles, afin de les y détruire.

Pour lutter contre les champignons, on essaie aussi d'enrober les semences, c'est-à-dire qu'on met le produit, le fongicide, sur la semence de manière qu'il agisse au moment où la plante pousse. Le fongicide est actif *in situ* au bon endroit et au bon moment, et à de faibles concentrations. On étudie également pourquoi une bactérie est patho-



Fresque du peintre de la révolution mexicaine, Diego Rivera, illustrant la culture et la préparation de galettes de maïs. Le maïs est cultivé et cuisiné depuis 4 500 ans au Mexique, on en retrouve les

traces sur les silex taillés du Néolithique. Les techniques agricoles modernes sauvegardent les gènes de rusticité des anciennes cultures et insèrent de nouveaux gènes de résistance.

gène pour une plante et on confère à la plante, par génie génétique, la résistance adéquate.

LE REMÈDE ET LE MAL

Il est cependant impossible d'imaginer qu'on puisse se débarrasser des bactéries, des insectes ou des virus. La lutte est perpétuelle et sans relâche, d'autant que l'on perturbe un système écologique global.

Prenons l'exemple des fruits, symbole du paradis terrestre : n'importe qui a envie de manger des fruits, y compris les insectes, donc ils méritent une protection très forte à base de traitements insecticides. Hélas ces traitements détruisent aussi une flore utile des sols et font place nette pour la prolifération des nuisibles résistants dont on a éliminé la concurrence. Tout déplacement de l'équilibre peut empirer une situation.

Il subsiste des maladies, comme la maladie de l'orme, où il n'y a pas de produit, pas de solution agronomique : l'impossible est peut-être temporaire, mais tant que la solution est absente... vous ne pourrez jamais définitivement éliminer un champignon pathogène et, partant sa dissémination épidémique, d'autant qu'on ne met pas en œuvre les mêmes moyens pour sauver un arbre et pour sauver un homme.

On sait transformer les animaux en insérant de nouveaux gènes, et l'on sait aussi cloner ces animaux. Une équipe de Jouy-en-Josas a cloné des veaux, il y a maintenant quatre ans. Aujourd'hui l'INRA examine avec l'INSERM la possibilité de modifier les porcs, afin qu'ils puissent servir de porte-greffe pour l'homme. On touche, ce faisant, des problèmes éthiques car nous avons en tête le docteur Moreau qui transformait des cochons en hommes. Le public et aussi les chercheurs tentent de déterminer une éthique déterminant les responsabilités de la science, plus d'ailleurs que celle des scientifiques.

LES RAISONS DE L'IRRATIONNEL

Je crois à trois points. Le bien-être animal qui bien sûr doit être respecté ; nous tentons de mesurer ce bien-être, ce qui est difficile. Le monde agronomique porte une attention particulière aux animaux, qui ne sont pas considérés comme des cobayes, mais en tant que partenaires d'étude. Le deuxième point est le transfert de ces connaissances au cas de l'homme. Il faut se donner un impossible moral : ne pas conduire d'expériences inutiles et ne pas faire sur l'homme un certain nombre d'expériences qu'on fait sur l'animal. L'exemple typique est

le clonage des veaux. D'ailleurs quand l'INRA a fait son expérience, j'ai interrogé les scientifiques. Leurs réponses ont été satisfaisantes : les expériences sur les animaux clonés sont utiles car elles permettent de distinguer clairement ce qui est dû au génome de ce qui est dû à l'environnement. Elles permettent des recherches sur la résistance aux maladies ou sur la nutrition qui sont beaucoup plus économiques en termes animaux.

On ne peut voir avec la même indulgence les débuts de clonage d'embryons humains pratiqués aux États-Unis peu de temps après et cela avait scandalisé tout le monde. Il faut savoir cloisonner ce type de recherche. Dans les années 1986-1987, on avait trouvé une sonde d'acide nucléique qui se greffait spécifiquement sur le chromosome Y et déterminait si l'embryon était mâle ou femelle. Son utilisation chez l'Homme est interdite.

Le troisième point dépasse l'éthique, laquelle n'est pas toujours un garde-fou suffisant : le consommateur n'acceptera jamais des produits issus de traitements zootechniques qui leur paraîtraient déviants par rapport aux relations de l'homme avec l'animal.

Cette attitude irrationnelle a en fait un sens. Même si les hormones de synthèse sont en tout point identiques aux hormones naturelles, elles détruisent l'image du lait associé à la pureté : le public assimile l'injection d'hormones à un dopage. Les sensibilités sont évidemment dépendantes de la richesse du pays.

L'augmentation de la productivité est toujours une préoccupation, cependant, et c'est horrible à dire, les estomacs solvables sont saturés. Bien sûr, ces techniques pourraient être utiles dans les pays où le lait manque, mais, là encore, pouvons-nous préconiser dans les pays en développement des techniques qu'on ne voudrait pas utiliser ?

L'AGRICULTURE, SOURCE D'ÉNERGIE ?

L'utilisation de végétaux comme source d'énergie ou de molécules intéressantes est ancienne : jusqu'à la révolution industrielle, le bois de chauffage assurait l'essentiel de notre approvisionnement énergétique et, après le choc pétrolier des années 1973, nombre de scientifiques ont voulu exploiter l'énergie solaire.

La consommation d'énergie par habitant dans un pays développé comme le nôtre est de quatre tonnes équivalent-pétrole par habitant, dont 20 pour cent pour les transports, alors que le rayonnement solaire correspond à 280 tonnes équivalent en pétrole par habitant. Le second chiffre impressionne. Hélas, il faut

regarder le rendement : avec un rendement de conversion d'un pour cent, un tiers de la surface cultivable devrait être alloué aux transports. Or le rendement de la photosynthèse est entre 0,1 et 0,33 pour cent et de plus cette énergie est diluée alors que les énergies fossiles sont concentrées.

La rentabilité économique des biocarburants est encore inférieure à celle des carburants fossiles par un facteur de deux à trois et elle dépend de la fiscalité. Mais il subsiste un coût d'opportunité : un agriculteur peut avoir intérêt à mettre une jachère en production industrielle de biocarburants.

On cherche aussi à coupler la production de biocarburants à la création de produits à forte valeur ajoutée. Il y a une filière éthanol qui vient du blé et le sous-produit va en alimentation animale et il y a une filière diester avec le colza qui laisse du glycérol ; Rhône-Poulenc examine une chimie fondée sur le glycérol de manière à augmenter la valeur du tout. Parallèlement les matériaux biodégradables comme les huiles ou les détergents seraient écologiquement intéressants, car la pollution naissant de déversement d'huile, de vidange notamment, est une menace pour l'environnement. Toutefois, ces cultures ne doivent évidemment pas employer trop d'engrais à base de nitrates ou de phosphates.

LA CHIMIE VERTE

Les plantes sont des usines chimiques absolument extraordinaires : elles synthétisent ce que l'homme lui-même n'est pas capable de synthétiser très facilement et très spontanément. On part de l'énergie solaire et à la fin, grâce à cette usine végétale, on produit des molécules extrêmement complexes. On exploite cette capacité pour faire des médicaments et des produits de base de l'industrie chimique, et l'ingénierie génétique peut nous aider à produire des éléments à haute valeur ajoutée.

Les impossibles en agriculture sont rares, mais les progrès ne sont pas économiquement transposables d'un pays à l'autre. La difficulté majeure est celle d'un village agricole global interdépendant où les transferts, bénéfiques et maléfiques, sont rapides. La gestion de l'écosystème Terre reste à imaginer.

Guy PAILLOTIN est Président de l'Institut National de la Recherche Agronomique.

Ce texte est la retranscription du débat enregistré avec Émile Noël, qui sera diffusé sur France Culture le 8 mai 1996, à 9 heures.

Histoire de l'arc-en-ciel

JEAN-LOUIS RICARD

Plus de 2 000 ans ont été nécessaires à la compréhension et à l'élaboration de la théorie de ce phénomène naturel.

Pour les Scandinaves c'est un pont entre le ciel et la Terre, permettant aux dieux de venir sur Terre ; pour les Incas, c'est un cadeau du Soleil ; pour d'autres Indiens, c'est l'arc de guerre des dieux de l'atmosphère ou le chemin emprunté par les morts pour monter au ciel. Selon une légende irlandaise, un pot d'or se trouverait à chaque pied de l'arc-en-ciel. Le phénomène est parfois assimilé à un monstre ou à un serpent. D'après le culte des Fôn du Dahomey, en Afrique occidentale, le dieu Dan de la fécondité et de la richesse se manifeste sous la forme d'un arc-en-ciel qui encercle le monde, et il est symbolisé par un serpent qui se mord la queue.

Les poètes grecs de l'Antiquité l'identifient à l'écharpe multicolore de la déesse Iris. Fille du Titan Thaumas et de l'Océanide Électre, elle est sœur des Harpies, créatures répugnantes au corps d'oiseau et à tête de femme, ravisseuses d'enfants et d'âmes. Zéphyr, le vent d'Ouest, aurait été son époux. Elle est figurée sur des vases et sur des bas-reliefs vêtue d'une longue tunique, les cheveux retenus par un bandeau et des ailes aux épaules : elle porte une écharpe légère dont les couleurs au soleil font un arc-en-ciel.

Dans la Bible, l'arc-en-ciel est le symbole de l'alliance que Dieu a conclue avec l'homme après le déluge : la postérité de Noé n'a plus à craindre un nouveau déluge. Dans l'Apocalypse, l'arc-en-ciel apparaît autour du trône de Dieu sous forme de lumière. Ce phénomène naturel a été très souvent représenté, mais quelle en était l'interprétation ?

Aristote est le premier philosophe à s'intéresser à l'arc-

en-ciel. Dans les *Météores*, il suppose que les rayons solaires se réfléchissent sur la surface externe des gouttes d'eau du nuage et que l'ombre de ce dernier, mêlée aux rayons du soleil, produit les couleurs de l'arc. Selon Aristote, le nuage est une surface d'eau noire ; or, la lumière traversant une surface noire devient rouge, comme la flamme du bois qui brûle : c'est l'origine de la couleur rouge de l'arc-en-ciel. Aristote ne voit que trois couleurs, le rouge, le vert et le violet. Ces deux dernières couleurs sont dues à l'atténuation de l'intensité lumineuse avec la distance : une réflexion proche expliquerait la couleur rouge, une réflexion plus éloignée le vert et la plus lointaine, le violet. Les Grecs, et notamment Aristote, distin-



Iris, parée de son écharpe, symbolisait l'arc-en-ciel pour les Grecs. Elle est représentée ici, sur un boîtier de montre.

guaient mal la lumière de la vision. La théorie d'Aristote, peu compatible avec les théories actuelles, domina pourtant pendant près de 2 000 ans.

Contrairement à l'ouïe et à l'odorat, la vue, comme le toucher, était un sens actif : selon Platon, un «quid» (quelque chose) sortait de l'œil pour se diriger vers l'objet et le tâter. Euclide, puis Ptolémée, donnèrent les principales caractéristiques de ce rayon visuel émergeant de l'œil, notamment qu'il se propage en ligne droite.

L'OPTIQUE ARABE

Les Arabes abandonnent la notion de rayon visuel émis par l'œil au profit du rayon de lumière issu de l'objet et pénétrant dans l'œil. Né à Bassorah, en Irak, en 965, et mort au Caire, en 1039, Alhazen comprend que la réfraction est un phénomène fondamental en optique. Il donne les lois de la réflexion, et établit des lois qualitatives observées lors de phénomènes de réfraction. Son *Discours de la lumière* ne sera imprimé en Occident qu'en 1572. Jusqu'à la fin du XIV^e siècle, l'optique arabe aura une influence notable ; elle ne sera supplantée par l'optique de l'Occident qu'à la fin du XVI^e siècle.

Ainsi, au XIII^e siècle, Robert Grosseteste, évêque de Lincoln et fondateur de l'école scientifique d'Oxford, s'intéresse à la réfraction. Il pressent que la réfraction est à l'origine des arcs-en-ciel, mais son interprétation est fautive. Il formule une loi erronée de la réfraction, où le rayon réfracté suit la bissectrice de l'angle formé par la normale et le rayon incident (depuis plusieurs siècles, Alhazen avait formulé une théorie plus élaborée). En 1266, constatant que des arcs-en-ciel apparaissent aussi dans des cascades, son disciple Roger Bacon émet l'idée que l'arc-en-ciel est produit par des réflexions dans les gouttes de pluie. Contrairement à Grosseteste, il ne mentionne pas la réfraction dans les causes possibles d'un arc-en-ciel.

À la même époque, à la fin du XIII^e siècle, le physicien et philosophe polonais Vitellion, reprend les hypothèses d'Alhazen et montre que la déviation des rayons lumineux par la réfraction est d'autant plus importante que le milieu est dense. Il comprend que ce phénomène intervient dans la formation des arcs-en-ciel. Son œuvre, méconnue, ne sera publiée qu'en 1572, en même temps que celle d'Alhazen.

C'est un autre dominicain, le moine Thierry de Freiberg (1250-1310), qui observe la réfraction à l'aide de flacons