

■ POUR LA
SCIENCE

Janvier 1996

édition française de

**SCIENTIFIC
AMERICAN**

**LE THÉORÈME
DE FERMAT**

LA SURPÊCHE

IMMUNITÉ ET CERVEAU

CLIMAT ET CHAOS

**LA CRISE DE LA FIN
DU TRIAS**

**LA SCIENCE
ET LES JONGLEURS**

LA LOI DES GÈNES

**LES MÉMOIRES
HOLOGRAPHIQUES**

M 2687-219-38.00 F



Canada : \$ 6,75

Bloc-notes de Didier Nordon 5

Point de vue : Expertise et recherche
par Pierre Panon 6

Les impossibles de la météorologie
par Hervé Le Treut 8

 **Présence de l'histoire**
par Robert Labeyrie 12

Science et gastronomie :
Vins sans lépôt 14

Jeu-concours numéro 19 :
Pliage et géométrie 23

Perspectives scientifiques :
Combien d'emplois perdus? 16
De Néandertal à Cro-Magnon 17

Panache fossile 20

Trop de glutamine 21

Des toxines aux mini-protéines 22

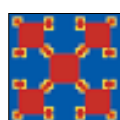
Pollution spatiale 23

Du coton «vert» 24

Un contrat de thèse 25

Les jaunes du Moyen Âge 26

 **Logique et calcul,**
par Jean-Paul Delahaye 100

 **Visions mathématiques,**
par Ian Stewart 104

L'image du mois
Le patient parasite de la mante religieuse 106

 **Analyses de livres** 108
Le xx^e siècle,
Méga expériences,

La vie en catastrophes,
Guide des sauterelles, grillons et criquets d'Europe occidentale,
La propriété intellectuelle dans le domaine du vivant.

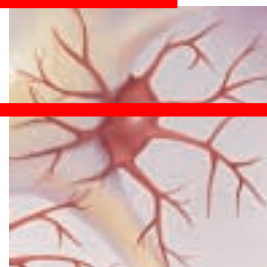
Les excès de la pêche en mer 28

par Carl Safina
Les poissons disparaissent des océans parce qu'ils sont trop pêchés. La pêche industrielle moderne devra modifier ses techniques si elle veut subsister.



Le système immunitaire du cerveau 38

par Wolfgang Streit et Carol Kincaid-Colton
Le cerveau est formé de cellules microgliales. Normalement protectrices, ces cellules peuvent détruire le tissu cérébral et contribuer au développement de certaines maladies.



La crise biologique à la transition Trias-Jurassique 46

par Gilles Cuny
Il y a 220 millions d'années, la faune s'est profondément modifiée. Les grands reptiles du Trias ont cédé la place aux dinosaures, et les lignées modernes dont les mammifères, se sont mises en place.



L'origine des glaciations 56

par Wallace Broecker
Dans le passé, les températures sur Terre ont varié de plus de dix degrés en quelques dizaines d'années seulement. De tels sauts climatiques auront-ils encore lieu?

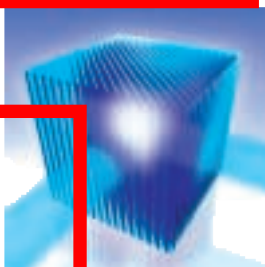


Les mémoires holographiques

64

par Demetri Psaltis
et Fai Mok

Après plus de 30 ans de recherches, les physiciens parviennent à utiliser l'holographie pour le stockage de données dans des mémoires aussi rapides que vastes.

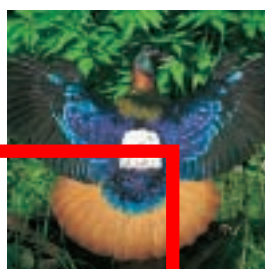


La loi des gènes

72

par Richard Dawkins

La vie n'a-t-elle d'autre but que d'assurer la survie des gènes? C'est ce que semble indiquer un nouvel examen de la sélection naturelle.

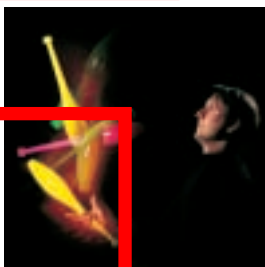


La science de la jonglerie

80

par Peter Beek
et Arthur Lewbel

Comment les jongleurs parviennent-ils à lancer et à rattraper balles et anneaux avec tant d'adresse? L'étude de leur activité est utile en psychomotricité, en robotique et en mathématiques.



De Diophante à Fermat

88

par Christian Houzel

Le théorème de Fermat, récemment démontré, a son origine dans des problèmes qui datent du deuxième millénaire avant notre ère.



De source ludique

Un des moteurs de la science est de nature ludique. Il arrive que les scientifiques cachent cette source d'inspiration : il est de bon augure, pour obtenir des crédits, toujours plus rares, de définir avec une cuistrerie pesante des projets de recherche. Ainsi le titre *La science de la jonglerie* (page 80) pourrait se transformer en «Analyse séquentielle des comportements neuromoteurs lors du contrôle de sphères multiples dans un champ gravitationnel». Cela vous aurait une toute autre allure...

L'heure n'est pas à l'humour. En ces temps difficiles, le luxe de critères artistiques est-il permis? Comment argumenter avec raison sur ce point? Peut-être en donnant des exemples certes un peu éculés, mais qui n'en sont pas moins vrais. Toute la théorie des probabilités est née d'un problème sur le jeu de dés résolu par Pascal. Les questions posées et résolues depuis les Grecs en théorie des nombres ont été mises à profit en cryptographie, le codage de nos cartes à puce en témoigne. Enfin comment ne pas invoquer des références d'autorité : Einstein, Gamow et les meilleurs esprits étaient passionnés de petites questions mathématiques. *A contrario*, nous n'éliminerons pas toute la tristesse du monde par des discours sentencieux. Pourquoi faut-il, en sciences, nous interroger sempiternellement sur la valeur de nos intérêts? Parce que c'est la mode de juger de tout?

Il faut peut-être avoir la stature du mathématicien John Horton Conway pour oser s'intéresser à l'étonnante suite de commentaires engendrée par le nombre $1 : 1, 11, 31, 1311$ (Les commentaires du mathématicien, par Jean-Paul Delahaye, page 100). Dans les deux articles cités ici, le regard du scientifique nous transmet une vision originale et plaisante. Cette beauté n'est-elle que dans l'œil du mathématicien entraîné? Aux lecteurs de trancher.

Philippe BOULANGER

Par Didier Nordon

Prévisions passéistes

Gouverner, c'est prévoir. Un bon politique doit voir loin. Mais l'astrophysique enseigne que plus on voit loin, plus ce qu'on voit est ancien : il faut le temps à la lumière de voyager jusqu'à nous.

Ainsi se trouve scientifiquement expliqué pourquoi les hommes politiques donnent si souvent l'impression de se cramponner à une vision archaïque de la société, sans percevoir ce qui y surgit de nouveau. C'est que, tous très bons, ils voient tous très loin !

Je te tiens, tu me tiens...

Selon Dominique Vinck «Les croyances scientifiques s'entre-tiennent» (*Sociologie des sciences*, éditions Armand Colin, 1995, p. 109). Jolie trouvaille – en un tiret – pour fustiger un grave travers : chaque science, incapable d'assurer son propre fondement, abandonne ce son à une autre ; chaque chercheur croit, ou fait semblant de croire, que les résultats admis sans discussion dans son domaine sont justifiés par quelque autre spécialité – qu'il ne connaît que vaguement. «La force d'un savant réside dans le fait qu'il limite ses doutes à ses confrères», écrivait déjà Elias Canetti (*Auto de fé*, éditions Gallimard, 1968, p. 80).

En somme les scientifiques ne sont pas des nains montés sur les épaules de

géants, suivant l'image classique, mais des nains montés sur les épaules les uns des autres – le nain tout au-dessous étant monté sur les épaules du nain tout au-dessus !

La critique contre ce mode de pensée est vieille, et nous avons vérifié qu'elle était lettre morte. On la trouve déjà dans Montaigne, qui ne devait pas être le premier. «Nous avons pris pour argent comptant le monde de Pythagore, que chaque expert doit être cru en son art. Le dialecticien se rapporte au grammairien de la signification des mots ; le métaphysicien emprunte du dialecticien les lieux des arguments ; le poète, du musicien les mesures ; le géomètre, de l'arithméticien les proportions ; les métaphysiciens prennent pour fondement les conjectures de la physique. Car chaque science a ses principes supposés par où le jugement humain est bridé de toutes parts» (*Essais*, II, XII, éditions Villey, p. 54).

Cette critique ne valait-elle pas les métaphysiciens qui ont prétendu prouver Dieu par le Big Bang ? Décidément, rien ne change en ce bas monde.

Liens de commerce

Dans le 7^e livre de 66 lettres, mais (hommage au 7^e mouvement ?) 7 auteurs seulement. Je traite ici d'un roman récent (*L'Affaire Grimaudi*, éditions du Rocher, 1995), dont les divers chapitres sont dus à 7 plumes

différentes, de celle d'Alain Absire jusqu'à celle de Daniel Zimmermann.

Multiplier ainsi les signatures est-il, commercialement parlant, une bonne idée ? La réponse dépend du comportement de P, l'acheteur potentiel moyen :

– s'il suffit que l'une au moins des 7 signatures déplaie à P pour qu'il achète le livre, l'idée de l'éditeur est – toujours commercialement parlant – excellente : le lectorat du livre est égal à la réunion des lectorats des 7 auteurs ;

– s'il suffit que l'une au moins des 7 signatures déplaie à P pour qu'il se refuse à acheter le livre, l'idée de l'éditeur est désastreuse : le lectorat du livre est égal à l'intersection des lectorats des 7 auteurs. Quasiment l'ensemble vide, à coup sûr.

Poser correctement un problème, c'est le résoudre. Dit-on que ne suis pas sûr d'avoir posé correctement le problème ? Mais, le temps d'une énonciation, j'ai effacé l'illusion que la théorie des ensembles pouvait servir à quelque chose.

Défiabilisation

Mots usés dans une liste de termes recommandés par le CNRS (BO 6, juin 1995) :

Fiabiliser : accroître la fiabilité.

Défiabiliser : diminuer la fiabilité.

Qu'on imagine le premier de ces mots, d'accord. Astoter, régler, arranger, voler, pistoler ou bidouiller – ne qualifient que le vulgaire bricolage du dimanche. La complexité des techniques modernes mérite mieux. Mais le second mot ! Faut-il comprendre que même au sein du dispositif le plus élaboré, on trouve des chandelles dont on souhaite économiser les bouts, au risque de rendre le dispositif moins fiable ?

La liste ne précise pas comment s'emploient les termes qu'elle répertorie. Si bien que le mot «défiabiliser» reste ambigu... et peu fiable. Décrit-il la conséquence malheureuse d'une initiative intempestive ou d'une action volontaire ? L'origine du terme pourrait être plus ancienne que la pratique des économies coûteuses : «La Création fut le premier acte de sabotage» (Cioran, *Syllogismes de l'amertume*, «Religion»). Eh oui : défiabiliser, c'est saboter ! Modernisons donc Cioran conformément aux directives du CNRS : «La Création fut le premier acte de défiabilisation».

Il a fauté

Certaines fautes d'orthographe sautent aux yeux sans même qu'on ait besoin de comprendre le texte où elles se trouvent. Cela rend des services. Face à une copie mal rédigée, dont les raisonnements sont si tortueux qu'ils finissent par échapper à toute catégorisation du type exact/inexact, c'est un soulagement pour le correcteur que d'apercevoir une faute d'orthographe. Un gros coup de rouge, et il peut se bercer de l'illusion que l'étudiant aura l'impression d'avoir été lu...

Mais comment réagir en présence d'un livre sérieux, difficile, dont l'orthographe est défaillante ? La pensée d'un auteur qui confond régulièrement ce et se, hésite sur les marques du pluriel, mérite-t-elle qu'on s'efforce de la pénétrer ?

La question de l'orthographe rappelle celle de la forme en art : sans contraintes formelles, il n'y a plus de fond. À l'époque classique, un individu incapable de compter jusqu'à 12 n'était pas un poète. De même, aujourd'hui, dans un texte savant, la profusion de fautes d'orthographe peut à bon droit inquiéter le lecteur. La question «à quand la prochaine?» finit par parasiter son esprit, au détriment d'une tentative de compréhension du texte.

Cela dit, l'auteur a quelquefois des bonheurs d'expression. «La fréquentation assidue des médias modernes conduit à une perte de vécu. Tout n'est plus qu'expériences de seconde main», déplore-t-il. Et d'en citer, comme exemple, le sexe ! (Patrick Trousson, *Le recours de la science au mythe*, éditions L'Harmattan, 1995, p. 26).

Expertise et recherche

PIERRE PAPON

La récente controverse sur le démantèlement de la plate-forme offshore de la Société Shell, en mer du Nord, la controverse plus ancienne sur la fiabilité des tests de dépistage de la séropositivité ou les débats autour du possible réchauffement du climat de la Terre montrent l'importance qu'a pris l'expertise scientifique et technique dans la vie des nations. Les scientifiques sont-ils en mesure de donner un avis fondé sur ces problèmes dont ils sont des spécialistes ? Dans quelles conditions peuvent-ils donner des avis ?

La prise de décisions importantes pour la société nécessite souvent des connaissances scientifiques et techniques qui, pour la plupart, proviennent de la recherche, avec sa capacité d'anticiper et de prévoir le déroulement de phénomènes physiques, chimiques ou biologiques, la science aide à prédire les conséquences des décisions et à préparer des stratégies. Ainsi les décideurs (hommes politiques, responsables d'administration ou d'entreprise) ont recours à des experts pour organiser les systèmes nationaux de défense, de santé, de transports, de gestion de l'environnement...

Cette expertise a souvent un caractère officiel, «statutaire» en quelque sorte : dans notre pays, une dizaine d'organismes de recherche publics ont ainsi la mission explicite de fournir des avis officiels, de formuler des diagnostics sur des problèmes qui préoccupent les pouvoirs publics. Il peut s'agir de santé publique, pour l'INSERM, de préservation des ressources océaniques, pour l'IFREMER, de ressources agronomiques, pour l'INRA... au total, 16 pour cent de la dépense publique de recherche et de développement est consacré à l'étude de problèmes que les pouvoirs publics doivent résoudre. L'expertise est la traduction de l'état de la connaissance scientifique, sous forme d'avis, de diagnostics ou de scénarios. Émanant d'un organisme public de recherche, elle a souvent un caractère officiel qui engage l'institution scientifique.

À l'avenir, le rôle de l'expertise scientifique et technique dans le processus de décision augmentera vraisemblablement pour au moins trois raisons. En premier lieu, les sociétés industrialisées tendent à édicter des normes et des règles pour autoriser la commercialisation de nouvelles produits. En deuxième lieu, elles se préoccupent de la sécurité des installations industrielles de leur impact sur l'environnement et la santé publique. Enfin le développement de services publics fortement automatisés (transports, systèmes de surveillance médicaux) nécessite une évaluation de la sécurité de leur fonctionnement.

La création récente du «comité consultatif d'éthique pour les sciences de la vie et de la santé», puis du «collège de la prévention des risques technologiques», témoigne de la prise de conscience croissante de la nécessité d'organiser, voire de contrôler, l'expertise.

UNE ÉTHIQUE DE LA CONNAISSANCE

Le développement de l'expertise appelle d'une part, un réexamen des relations entre les scientifiques et le monde politique et d'autre part, une promotion d'une éthique de la connaissance : il faut dissocier soigneusement, dans le processus nécessaire à la prise de décision publique, ce qui peut être considéré comme une approche de caractère prospectif (l'expertise porte un diagnostic, présente des scénarios), de ce qui relève d'un système de normes et de valeurs propres à nos sociétés, avec ses besoins et ses attentes, qui seront prises en compte par les décideurs (les hommes politiques, par exemple). Ces règles et ces normes, d'ailleurs, n'appartiennent pas au champ de la science et de la technique.

Ainsi les scénarios scientifiques élaborés pour évaluer les impacts des activités humaines sur les climats ne suffisent pas, par eux-mêmes, à la prise de décisions. En effet, il faut savoir apprécier, par exemple, les risques économiques ou sociaux que l'on est prêt à assumer si l'on ne prend aucune mesure pour limiter les rejets de gaz carbonique dans l'atmosphère. La décision

politique est aussi fondée sur l'appréciation des risques. L'une des règles devrait être de bien séparer ces deux niveaux, que les experts, mais aussi les politiques, tendent à confondre. Combien de fois entend-on ainsi imposer une décision parce qu'elle s'appuie sur une solide expertise scientifique !

L'éthique de la connaissance, dans le contexte de la prise de décision, suppose aussi que les scientifiques explicitent les limites de leurs connaissances et qu'ils rappellent constamment à leurs interlocuteurs la quasi-impossibilité d'éliminer les risques et les incertitudes dans tous les domaines de l'action humaine. Qu'il s'agisse de santé, d'environnement ou d'exploitation des ressources, leurs avis seront généralement fondés sur des connaissances incomplètes, sur des données dont la fiabilité n'est pas totale. Leurs connaissances peuvent être entachées d'incertitudes, les décideurs doivent le savoir même si, pour eux, la situation est inconfortable... On va souvent au devant des difficultés quand les scientifiques confondent le processus de production de savoir avec sa

traduction en avis, analyses et diagnostics dans le contexte de la prise de décision que, par essence, souvent lieu de conflits. Il est donc sage de séparer, au sein des institutions scientifiques, les fonctions de production du savoir de celles d'expertise, même si l'expertise s'enrichit des résultats et des méthodes de la recherche et si elle lui ouvre de nouveaux champs à explorer.

Il est clair, enfin, que les scientifiques qui participent aux expertises doivent formuler leurs avis en toute indépendance. Souvent, en effet, des avis peuvent émaner de l'administration, des collectivités territoriales, des entreprises. Un projet d'aménagement peut avoir un impact négatif sur l'environnement (par exemple). Il appartient donc aux institutions dont dépendent les scientifiques de les protéger des pressions extérieures dans l'exercice de leur mission d'expertise, tout en leur donnant le moyen d'investigation nécessaires.

La société a besoin d'une expertise fondée sur la connaissance scientifique, qui lui donne une vision prospective, mais elle doit être consciente que cet exercice ne saurait éliminer complètement les risques et les incertitudes.

Pierre Papon est professeur à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de Paris et président de l'Observatoire des sciences et des techniques.

Les impossibles de la météorologie

HERVÉ LE TREUT

La météorologie, c'est le temps qu'il va faire. La climatologie, c'est la météorologie à une échelle de temps supérieure, c'est le temps qu'il fera au cours des temps. Déjà, en météorologie, les impossibles abondent : il est presque impossible de prévoir les conditions atmosphériques plus de quelques jours à l'avance, et il est certainement impossible de modifier le temps.

Les questions posées au climatologue sont plus vastes. Pouvons-nous trouver les causes des températures passées du Globe ? Pouvons-nous prévoir celles qui régneront dans un siècle ou dans quelques milliers d'années ? Correspondent-elles aux autres témoignages passés du climat ?

OMNIPRÉSENCE DE LA MÉTÉOROLOGIE

Éliminons une possibilité : il n'existe pas de pays où le temps soit constant et la météorologie... inutile, parce que certaine. Toutes les régions de notre planète sont soumises au moins aux cycles des saisons : même dans les régions africaines, où une saison sèche alterne avec une saison humide, la prévision de l'arrivée de la saison humide pose problème. Si les interrogations météorologiques sont de nature différente dans les régions à caractère tropical et dans les régions à caractère tempéré, la variabilité reste une constante.

Toute prévision est, par définition, incertaine. La prévision météo est associée à une probabilité. Il y a, par exemple, 90 pour cent de chance que la température soit comprise demain entre 5 et 7 °C. En Angleterre, où la culture météo est plus développée, la prévision statistique passe mieux : en France, notre culture ne nous incite pas à chiffrer nos incertitudes, et les prévisions diffusées n'en font pas état.

Le calcul de l'incertitude présente aussi une difficulté technique : pour indiquer un pourcentage de chance, il faudrait faire tourner (sur ordinateur) la machine climatique un grand nombre de fois avec différents chiffres de départ balayant les incertitudes initiales, et comp-

ter le pourcentage de cas où l'on a obtenu de la pluie, où l'on a obtenu un temps sec, etc. Ces prévisions statistiques prennent beaucoup de temps et doivent se faire en temps réel. Quand on connaît les temps de calcul, on comprend qu'on ne puisse faire tourner 100 fois le modèle. Cet impossible est peut-être temporaire, mais, parallèlement à l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs, le nombre des données prises en compte augmente.

LE DIAGNOSTIC MÉTÉOROLOGIQUE : DU FOLKLORE AU CALCUL

La météo est le domaine où la coopération internationale est la plus claire, la plus forte et sans doute la moins connue. La prévision météo prend en compte tout ce qui se passe sur la planète : les échanges entre les masses gazeuses sont si rapides et si intenses que l'on a besoin, même pour prévoir le temps dans l'hémisphère Nord, de se préoccuper de ce qui se passe dans l'hémisphère Sud.

La prévision météo commence par le recueil de données physiques à l'échelle de la planète. L'Organisation météorologique mondiale pilote un réseau de mesures, comportant des appareils implantés au sol, sur les bateaux, les satellites, les avions, et sur de petits ballons instrumentés. Toutes les 12 heures, les informations sont centralisées en deux nœuds : l'un en Angleterre et l'autre aux États-Unis.

On se imagine ainsi une image de la circulation de l'atmosphère au temps initial, image dont l'évolution est ensuite traitée par des modèles numériques. Ces modèles s'appuient sur des équations qui sont connues depuis le siècle dernier, mais qu'on ne pouvait exploiter faute d'ordinateurs suffisamment puissants : ils sont aujourd'hui les plus gros consommateurs de temps d'ordinateur. Tous les 100 kilomètres sur la planète, des programmes calculent les paramètres physiques en une série de points répartis sur une trentaine de niveaux de l'atmosphère. De demi-heure en demi-heure, on calcule

l'évolution du temps à partir de l'état initial observé.

L'accord entre les prévisions et la réalité s'est constamment amélioré au cours des 20 dernières années : on est passé d'une échance utile de deux jours au début des années 1970 à cinq ou six jours aujourd'hui.

Il y a longtemps que les prévisions calculées ont dépassé les évaluations fondées sur les corrélations observées (à Aurillac un nuage au-dessus d'une montagne était censé indiquer l'arrivée de la pluie). Il est resté quelques prédictions utiles, surtout en météo tropicale, mais les corrélations relevées dans le passé n'étaient, pour la plupart, qu'un folklore relevant plus de la croyance que d'un fait avéré. Les dictons populaires, pour chatouiller qu'ils soient, n'en sont pas plus vérités. La prévision scientifique a gagné en rigueur ce qu'elle a perdu en couleur locale. Malheureusement elle nous laisse insatisfaits, car une seule chose nous importe vraiment : va-t-il pleuvoir ici et maintenant. Or cette donnée locale est la plus inaccessible.

LES LIMITES INFRANCHISSABLES

Deux limites faisaient obstacle aux progrès de la météorologie. Les limites techniques résultant du nombre des points de mesure des données (pression, température, etc.) et de la puissance des ordinateurs ont été levées dans les dernières années : il n'y a plus d'impossibles techniques. Les incapacités substantielles tiennent à la nature même du système atmosphérique, déterministe, mais non prévisible. Une expérience illustre ce propos : les météorologues sont partis de deux états très voisins de l'atmosphère, qui ne différaient que par un centième de degré à Bordeaux, et ont calculé, toutes choses égales par ailleurs, l'évolution de ces deux atmosphères. Au bout de cinq à six jours, les différences se sont révélées si notables qu'elles correspondaient à deux états de l'atmosphère totalement distincts. Ainsi le système Terre est fortement non linéaire : de petites incertitudes initiales contaminent toute le Globe en cinq à dix jours.

Cette limite est infranchissable. C'est cette durée de quelques jours qui sépare les domaines de la météorologie et de la climatologie.

Dès l'apparition des ordinateurs, un météorologue, Edouard Lorenz, a établi l'existence de systèmes dynamiques non linéaires, qu'il a baptisés indéterministes. E. Lorenz eut l'idée de réduire à trois équations le système régissant l'atmosphère

et montra que ce système très simplifié était déjà imprévisible. Cette étude choquante eut des applications dans beaucoup d'autres domaines : l'idée des systèmes chaotiques était lancée.

LES PÉRIODICITÉS CLIMATIQUES

Heureusement pour notre compréhension, l'atmosphère après dix jours a un comportement macroscopiquement prévisible : les saisons et les zones climatiques témoignent de phénomènes régulateurs de la circulation atmosphérique.

Depuis les débuts de la marine à voile, les navigateurs ont recueilli des données sur la circulation atmosphérique. Halley, au XVII^e siècle, a étudié les premiers relevés des marins et observé les régularités de la circulation atmosphérique avec les vents d'Est, type alizé près de l'équateur, les vents d'Ouest à nos latitudes ; superposée à ces mouvements, une autre circulation brasse l'air, qui monte près de l'équateur (zone du pot au noir) dans les zones de vent d'Est, et qui redescend au Nord et au Sud vers 30 degrés Nord, 30 degrés Sud et marque les zones désertiques. Les limites de ces grandes cellules tropicales sont déterminées par la vitesse de rotation de la Terre qui les

empêche de se développer plus au Nord (comme elles le font par exemple sur la planète Mars). Ces circulations en cellules fixent le climat des tropiques avec une zone pluvieuse près de l'équateur et une zone sèche un peu au-delà de l'équateur.

La circulation dans ces cellules fluctue à des échelles de temps longues. Dans l'océan Pacifique, les zones d'ascendance et de descente de l'air se déplacent. Elles suivent des variations de température de l'océan de période trois à quatre ans, le cycle de El Niño observé par les pêcheurs péruviens. Ces pêcheurs avaient remarqué que des eaux chaudes chargées de poissons revenaient à intervalles réguliers le long des côtes du Pérou. Ils appelaient cette arrivée El Niño, du nom de l'enfant Jésus, parce qu'elle coïncidait avec Noël. À ces échelles de temps, de l'ordre de quelques années, la structure de la circulation atmosphérique est lentement modifiée par l'interaction avec l'océan : on voit se dessiner les premières échelles temporelles de la climatologie.

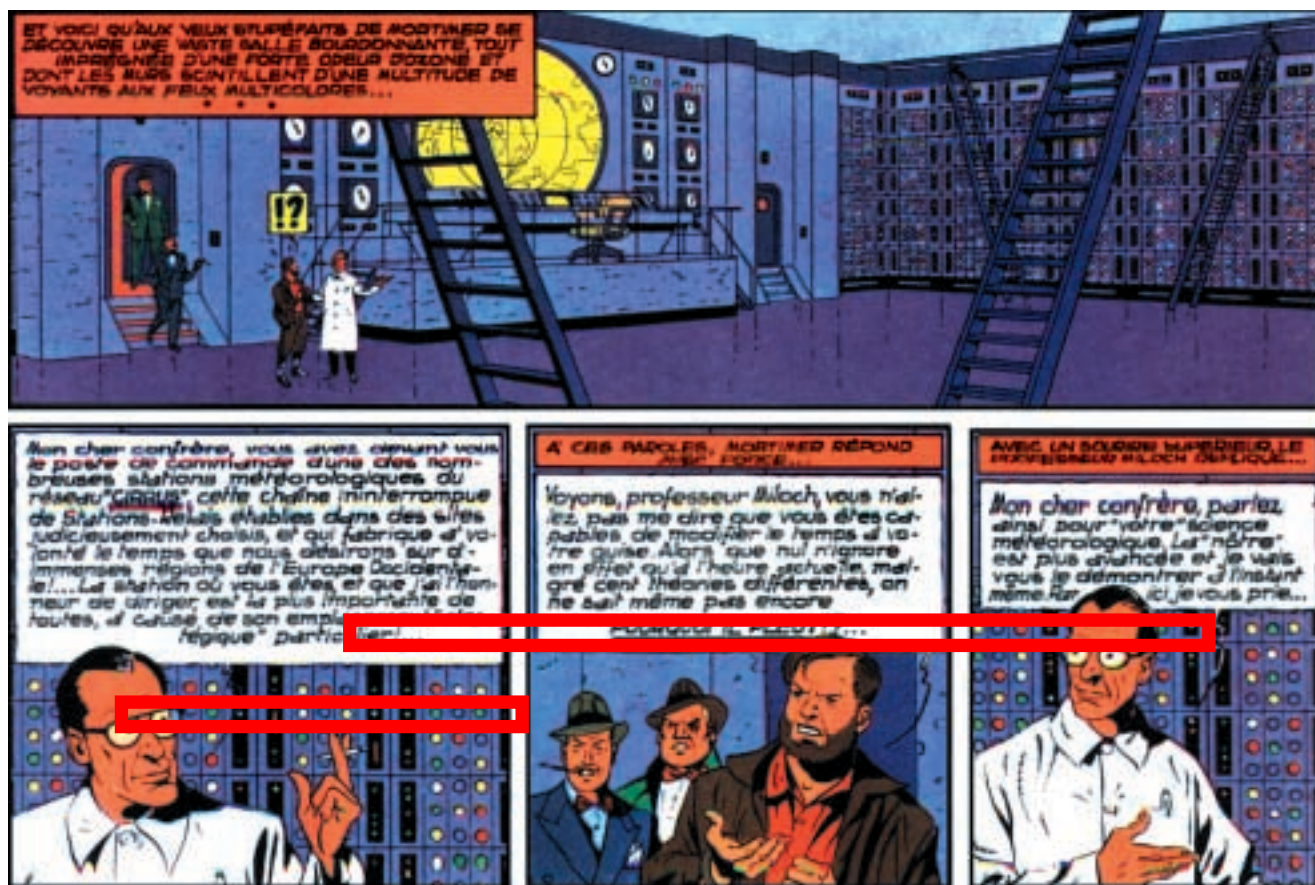
Les mouvements de l'atmosphère résultent de la convection et de la rotation de la Terre. Le rayonnement solaire, qui traverse l'atmosphère, est absorbé en partie par le sol ; l'air, chauffé par le bas, se dilate et monte, mais à la diffé-

rence de ce qui se passe dans une casserole, ces mouvements ascendants et descendants sont compliqués par la rotation de la Terre. La zone des déserts est déterminée par la vitesse de rotation de la planète, et même, lors des glaciations du passé, les zones désertiques ne se sont pas beaucoup déplacées. Il serait impossible de modifier les zones climatiques qui résultent de ces mouvements.

LA MESURE DU CLIMAT PASSÉ

On étudie les transformations du système climatique au cours du dernier million d'années par des carottages dans les glaces polaires ou dans les sédiments océaniques. Le climat a évolué avec des périodicités de l'ordre de 100 000 ans, auxquelles se superposent des périodicités un peu plus petites, de l'ordre de 40 000 ans et de 20 000 ans. Ces variations résultent de la course de la Terre sur son orbite. Au siècle dernier, un astronome serbe, Milankowitch avait prévu ces variations cycliques.

Les variations à 20 000 ans, les plus courtes, sont dues à la précession des équinoxes. La planète décrit une ellipse autour du Soleil, et la position de l'axe de rotation de la Terre, qui pointe alter-



Un impossible de la météorologie est présenté par Edgar P. Jacobs dans S.O.S. Météores.

nativement et vers le Soleil et dans la direction opposée au Soleil, définit quatre points qui sont les deux solstices et les deux équinoxes. Actuellement, au moment du solstice d'hiver, on est au plus près du Soleil ; il y a 10 000 ans, au moment du solstice d'hiver, on était au plus loin du Soleil. Le système saisonnier était amplifié par rapport à ce qu'il est aujourd'hui, et ce phénomène de précession des équinoxes a joué un rôle très important dans les transitions climatiques, par exemple sur toute la zone mésopotamienne, sur toute la zone du Sahara fertile. Cette variation quasi périodique de l'axe de rotation de la Terre est pilotée par l'influence des grosses planètes sur la trajectoire de la Terre autour du Soleil.

On connaît aussi très bien l'évolution du dioxyde de carbone ou du méthane au cours des derniers 200 000 ans grâce aux carottes prélevées dans les zones polaires et dans les sédiments océaniques. Laeneur en isotopes des glaces permet de retracer les températures passées, et les traces de gaz, le contenu de l'atmosphère. Dans les sédiments océaniques, les fossiles de petits animaux qui vivent dans des eaux de températures variées dénotent les températures prévalant à l'époque : certains de ces animaux vivant plutôt en surface ou plutôt au fond, on reconstitue les températures de l'océan à différents niveaux. Un marqueur de la température extrêmement puissant est le contenu en oxygène 18 des minuscules coquilles des foraminifères.

TERRE GELÉE ET SOLEIL JEUNE

Si, aux échelles de temps beaucoup plus longues, dépassant le million d'années, les indices de variations du système climatique sont plus rares, ils indiquent tous une grande stabilité. Cette fixité ne va pas de soi, car le climat actuel de la Terre n'est pas la solution unique d'un climat terrestre dont l'essentiel de l'apport énergétique vient du Soleil. Il y a 30 ans, on s'est aperçu qu'il existait un autre état très stable du système climatique, où toute la planète est recouverte de glace : dans ces conditions, la planète réfléchit presque intégralement le rayonnement solaire et ne se réchauffe pas. Cet état stable de la planète n'a jamais existé et il semble peu probable que le système Terre puisse bifurquer vers cette autre solution possible.

Le paradoxe du Soleil jeune est connexe : il y a trois milliards d'années le Soleil nous envoyait moins d'énergie qu'aujourd'hui. La Terre aurait dû être alors un astre mort et glacé ; or on ne

trouve pas la trace de cet état. C'est qu'il n'a jamais existé : la composition chimique de l'atmosphère de la planète de l'époque était telle que le pâle rayonnement émis par le Soleil était mieux absorbé.

Notre planète est une exception dans le Système solaire : son atmosphère contient très peu de dioxyde de carbone et beaucoup d'oxygène, au contraire de Vénus et de Mars, où le dioxyde de carbone est prépondérant : c'est la vie qui a consommé, sur Terre, le stock de dioxyde de carbone. Le dioxyde de carbone primitif aurait empêché, il y a trois milliards d'années, que la planète ne se dirige vers un état glaciaire permanent et stable.

LA PÉRIODICITÉ DES EXTINCTIONS

Une difficulté subsiste : comment expliquer les extinctions qui ont frappé périodiquement la faune et la flore, très approximativement tous les quelque 100 millions d'années ? On ne connaît pas de processus climatiques périodiques qui se renouvellent à ces échelles de temps et qui expliqueraient les extinctions. À l'échelle des dizaines ou des centaines de millions d'années, la dérive des continents domine l'évolution du système climatique.

Le système climatique qui règne depuis deux millions d'années, avec ces fluctuations entre âges glaciaires et âges interglaciaires, est associé à la répartition actuelle des continents, en particulier le continent antarctique qui est bien posé sur le pôle Sud. C'est à partir du moment où le continent antarctique s'est fixé que le climat est devenu moins chaud avec ses oscillations glaciaires-interglaciaires. L'évolution à plus long terme du climat semble dictée par l'évolution de la répartition des océans et des continents, évolution qui n'est pas un phénomène périodique.

Les grandes extinctions sont dues à des phénomènes climatiques puisqu'elles sont réparties uniformément sur le Globe terrestre. On les explique par un événement catastrophique, soit un météorite, soit un volcanisme intense. Pour l'instant ce type d'explication n'explique pas leur récurrence.

Hervé LE TREUT est directeur de recherche au CNRS et enseigne à l'École polytechnique. Une retranscription de ce débat, enregistré avec Émile Noël, sera diffusée sur France Culture le 10 janvier 1996, à 9 heures.

Goût et activité des médicaments

ROBERT LABEY

Le saule et la reine des prés poussent les pieds dans l'eau. Est-ce pour cette raison que l'écorce du saule et cette reine des prés sont efficaces contre les fièvres rhumatismales, dues à l'humidité de l'environnement ? Si tel est le cas, pourquoi le quinquina, qui est actif sur les « fièvres des marais » (le paludisme) pousse-t-il dans la moyenne montagne andine, loin des plaines impaludées ? Si la « Douce Nature » avait désigné le médicament adapté à la maladie comme le croyait le médecin alchimiste du XVI^e siècle, Paracelse, elle aurait effectivement guidé le guérisseur vers l'écorce de saule, mais quelle aurait été la « signature » dans le cas du quinquina ?

Les vertus thérapeutiques des médicaments ont été découvertes par le goût et par l'odeur qui éduquaient l'instinct. L'instinct, mot magique, mais qui rappelle que les animaux s'empoisonnent rarement. « Les effluves propres à chaque être guident l'animal à sa pâture, c'est ainsi que le non-poison est évité », écrivait Lucrèce. Ainsi, les vaches soufflent puissamment sur les touffes d'herbe qui, sous l'haleine chaude et humide, libèrent des odeurs identifiées ; les vaches s'écartent des plantes amères telles la gentiane, non

toxique, et la colchique très toxique. Les Charolaises dont le goût a été éteint par la sélection se précipitent au printemps sur les feuilles des colchiques et en meurent.

Selon Hippocrate, « il y a dans l'homme du salé, de l'amer, du doux, de l'acide et de l'astringent, du fade et de mille autres choses douées des propriétés les plus diverses en nombre et en force. » La

sensibilité olfactive et gustative a sans doute guidé la sélection des médicaments traditionnels : les substances thérapeutiques, qu'elles soient d'origine minérale ou végétale, ont souvent un goût désagréable, astringent, acide ou amer.

FER ET ASTRINGENCE

Au siècle de Louis XIV, le chimiste Nicolas Lémery condensa la qualité du fer par un mot : l'astringence. La saveur astringente n'est pas propre au fer ; on la retrouve dans tous les oxydes, et notamment dans les ocres qui « happent la langue ». Selon Lémery, « On reconnaît que la principale et même unique propriété médicale du fer est d'être astringent, c'est-à-dire de resserrer sur elles-mêmes les fibres de corps animés et de rétrécir les diamètres des vaisseaux. »

Or, dès la Préhistoire, le fer et ses oxydes furent liés à la force. L'ocre est de la terre argileuse, riche en oxydes de fer, et la poudre d'ocre préservait la peau des animaux du durcissement, de la putréfaction et de l'atteinte des vers et des insectes. Dans l'Antiquité, on faisait boire aux malades pâles de l'eau où avaient trempé de vieilles épées rouillées ; on nommait le fer comme le Dieu de la guerre, Mars.

Au XIX^e siècle, la mode imposa aux jeunes filles un régime privé de viandes saignantes ainsi qu'un corset comprimant les organes hématopoïétiques (le foie et la rate). Les jeunes filles étaient atteintes de chlorose. Le médecin et philosophe malouin Julien Offray de La Mettrie décrivait les symptômes et le traitement de la maladie : « D'abord pâles, vertes, livides, tremblantes, faibles, elles se soutiennent à peine sur leurs jambes, et lorsque l'action des remèdes martiaux a épaissi

leur sang, trop fluide auparavant, leurs lèvres, leurs joues prennent de la couleur ; et la chaleur, la force, accompagnent bientôt la formation du sang rouge, qui enfin peut rompre les vaisseaux utérins, sous la forme du flux menstruel. »

Dès 1713, le fer fut détecté dans le sang. Depuis, on en donne aux patients atteints d'un déficit chronique et grave en fer qui manifestent parfois un besoin

irrésistible de manger de la terre, de la peinture (le trouble se nomme la pica) ou de la glace (la pagophagie). Aujourd'hui, les petits Africains vivant dans les loyers insalubres des cités sont souvent atteints par manque de fer, et mangent, par défaut de terre, les vieilles peintures à la céruse (colorant blanc contenant du plomb) qui recouvrent les murs délabrés ; ils souffrent d'intoxication saturnienne (par le plomb).

VITAMINE C ET ACIDITÉ

Les Assyriens connaissaient les vertus de l'acidité pour traiter la « maladie fétide » le scorbut et ils en ont décrit les symptômes : gencives tuméfiées et ulcères dans la cavité buccale. Leur remède consistait en jus de raisin frais, le verjus, et l'empereur Ashurnasirpal en faisait importer de Basse Mésopotamie. Sous le climat des plaines du Tigre et de l'Euphrate, le jus de raisin mûr aurait fermenté trop vite.

À l'occasion de la croisade de Saint-Louis en Égypte, en 1249, un des croisés, Joinville, décrit les symptômes du scorbut : il accusa d'abord le mulet, un poison nécrophage que les croisés pêchaient dans le delta du Nil et qu'ils

mangeaient les jours de jeûne. Tous les croisés étaient atteints : « La chair de nos jambes sechaït toute et le cuir de nos jambes devint caillé de noir et de terre. Les chairs pourries venaient aux gencives, nul ne pouvait échapper à cette maladie » ; ce n'était pas le poison impur qui contaminait les croisés mais une alimentation essentiellement composée de pain et de porc salé. Joinville, prisonnier des Sarrasins, était mourant

lorsque ses geoliers lui donnèrent à boire une boisson qui le guérit, vraisemblablement un jus d'agrumes.

Pendant les longues traversées océaniques, le manque de fruits et de légumes frais favorisait le scorbut, mais les Anglais avaient observé que le citron prévenait l'apparition du mal. Le voyage des esclaves de l'Afrique vers les Amériques entraînait de lourdes pertes, et les



1. Le pavot.



2. La scille.

planteurs, attentifs à la capacité de travail des Noirs achetés aux négriers nantais et rochelais, observaient avec attention l'état de leur dentition.

En 1804, l'Amirauté anglaise rendit obligatoire la prise quotidienne de jus de citron, et les marins, indemnes du scorbut, assurèrent la suprématie de la marine anglaise ; les marins français affaiblis par la maladie furent vaincus à Trafalgar. En France, la situation du Service de santé de la marine était mauvaise : de nombreux postes étaient vacants, les soldes étaient médiocres et payées avec retard ; le souvenir des dispositions d'hygiène prises par la « Royale » fut perdu ; du jus de citron, on ne se souvint que de l'acidité et l'on prescrivit des gargasmes au vinaigre. L'échec fut total tant sur le plan thérapeutique que sur le plan militaire.

En Europe du Nord, croît une petite plante rampante vivace, aux feuilles rondes, nommée anason ou herbe à la cuillère qui contient autant de vitamine C que les oranges. Dès 1597, elle était considérée comme un remède efficace contre « l'ulcère corrompu et la puanteur de la bouche », mais la « connaissance » médicale ne se propageait pas aisément. Enfin, en 1928, le hongrois Szent-Gyorgy sépara du chou, puis du paprika, une substance qui nomma acide ascorbique : le scorbut était vaincu.

Verjus et paprika, jus de citron, chou ou herbe à la cuillère, tous contenaient l'indispensable vitamine C.

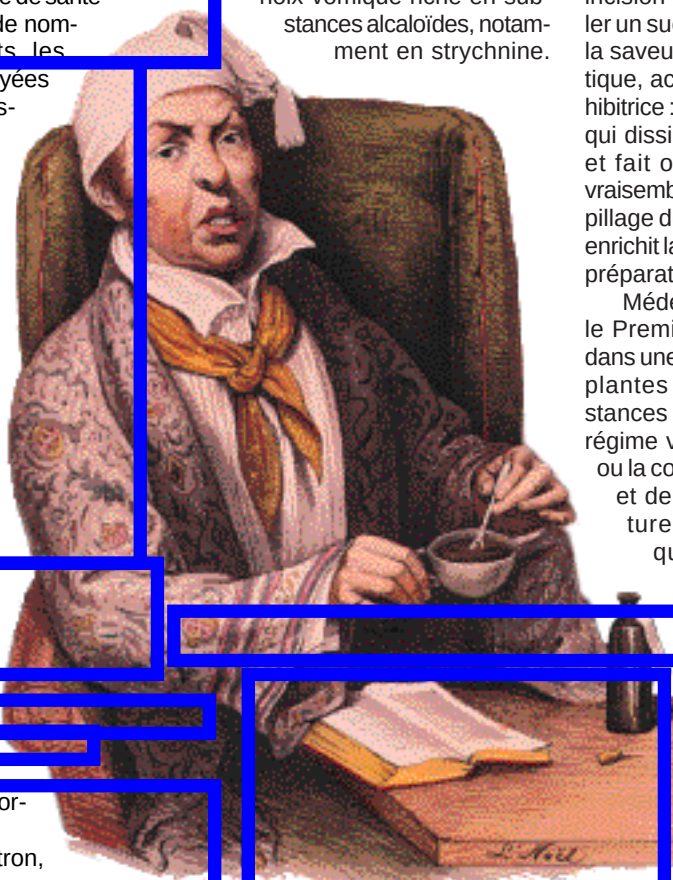
QUINQUINA, GENTIANE ET AMERTUME

Au cours de l'évolution, l'homme a classé les plantes en diverses catégories : celles que l'on mange avec plaisir ; celles que l'on peut manger, en périodes de disette, sans plaisir, mais sans inconvénients ; celles qui ont un goût bizarre. Parmi ces dernières, certaines tuent et d'autres, au contraire, stimulent les forces des personnes affaiblies : ce sont les médicaments, naguère nommés toniques amers ou excitants, regroupant aussi bien la gentiane que la feuille de cola ou le café.

D'autres plantes donnent l'illusion des paradis artificiels, de l'alcool obtenu par fermentation spontanée de jus sucrés aux stupéfiants. Enfin certaines plantes perturbent le fonctionnement de l'orga-

nisme, comme les laxatifs et les vomitifs, ou encore les diurétiques.

En Afrique et dans une partie de l'Asie, les graines amères du *Strophantus* (une liane) contiennent des poisons cardiotoxiques ; en Malaisie, d'autres toxiques cardiaques proviennent de l'upas, un suc laiteux obtenu par incision d'un arbre *Antiaris toxicaria*. Le vomiquier, arbre du Sud-Est asiatique, porte une graine, la noix vomique riche en substances alcaloïdes, notamment en strychnine.



3. Les médicaments traditionnels ont souvent un goût désagréable, amer, acide ou astringent.

Ces poisons, utilisés pour la chasse, étaient introduits dans de fines rainures creusées sur les flèches. On devait enlever la partie de l'animal qui avait reçu la flèche et l'empoisonnée pour pouvoir consommer le reste. L'usage criminel de ces poisons végétaux n'était pas rare. Ainsi les effets délétères de l'aconit sont mentionnés dans la Mythologie grecque : elle entrait déjà dans les poisons concoctés par Médée qui aida Jason à prendre la Toison d'or, avant de commettre, abandonnée par le héros, plusieurs empoisonnements.

Jusqu'au milieu du XVIII^e siècle, seuls trois poisons sont utilisés à des fins thérapeutiques : la scille, le pavot et le quinquina. La scille, plante méditerranéenne vivace à bulbe, ressemble à un gros oignon et soulage les œdèmes d'origine cardiaque. Le bulbe est composé d'écaillés serrées, rouges, sèches,

minces, sans goût et inactives ; les écaillés moyennes larges et épaisses laissent couler un suc visqueux, inodore, mais très amer. La scille résiste à la chaleur estivale et, à la première pluie, pousse une fleur aux graines diurétiques.

On cultivait le pavot pour son « huile d'oeillette » comestible, et c'est sans doute par accident que l'on constata qu'une incision dans la capsule laisse s'écouler un suc épais, brunissant à l'air et dont la saveur est très amère. Action hypnotique, action antalgique et action desinhibitrice : selon Homère, c'est « un produit qui dissipe la tristesse, calme la colère et fait oublier tous les maux ». C'est vraisemblablement Ménélas qui, lors d'un pillage de la ville égyptienne de Thèbes, enrichit la pharmacopée grecque de cette préparation.

Médecin à l'hôpital Saint-Louis, sous le Premier Empire, Jean Alibert réunit dans une même classe thérapeutique les plantes à saveur amère : « Des substances que la médecine emprunte au régime végétal pour agir sur la tonicité ou la contractilité fibrillaire de l'estomac et de l'intestin ». Quinquina, angusture, gentiane, petite centaurée, quassia, écorce de marronnier rouge, etc. : toutes agissent sur

Au début du XIX^e siècle, l'arsenal thérapeutique se composait d'une accumulation de drogues qui, pour la plupart, n'avaient ni identification précise, ni posologie exacte. L'homme a sélectionné

des substances animales, végétales ou minérales pour s'assu-

rer un meilleur équilibre physiologique et pour combattre certaines maladies. L'équilibre spontané entre dépenses et apports se poursuit depuis l'origine de l'humanité et même de l'animalité, grâce aux sensations éprouvées, et notamment grâce au goût.

De surcroît, lorsque l'homme est malade, son organisme a besoin de restaurer sa santé : la personne fatiguée recherche le sucre, celle qui est déshydratée l'eau et le sel, le déprimé ou le nerveux l'amer. Le chocolat noir amer a un rôle tonique. Aujourd'hui, on dispose de médicaments ciblés, et l'on pourrait peut-être y ajouter une aromatisation appropriée – salée, sucrée ou amère – qui en renforcerait l'action.

Robert Labeÿ a rédigé une thèse de Doctorat en pharmacie : *Sélection des médicaments traditionnels par le goût.*

Vins sans dépôt

On stabilise les vins destinés à l'exportation, afin d'éviter leurs dépôts de tartre.

Voici les froids de l'hiver : en cave, les cristaux de « tartre » qui précipitent dans les bouteilles de vin ne nuisent pas aux qualités du breuvage qui fait la fierté de notre pays, mais gênent l'exportation ou la vente aux clients difficiles et mal informés. Comment éviter ces diminutions de la valeur marchande et, pis encore, les retours ? Jean-Louis Escudier, Jean-Louis Batlle, Bernard Saint-Pierre, de la Station INRA de Pech Rouge, et M. Moutounet, de l'Institut supérieur de la vigne et du vin, ont mis au point une méthode d'équilibre des vins par électrodialyse.

L'acide tartrique est un constituant caractéristique du raisin, mais les sels qui lui sont associés sont peu solubles, de sorte que le bitartrate de potassium et le tartrate de calcium tendent naturellement à précipiter dans les vins, formant ce que l'on nomme communément le tartre. Comment éviter la sursaturation des vins bruts ?

Naguère, les producteurs qui voulaient éviter les dépôts de tartre faisaient subir à leurs bouteilles un séjour à basse température, pendant une dizaine de jours, en leur ajoutant du tartrate de potassium qui servait de germe de cristallisation. Le froid provoque la précipitation, parce que la solubilité limitée des sels

tartriques diminue avec la température, mais les polyphénols (une classe de molécules à laquelle appartiennent de nombreux colorants des vins rouges) maintiennent ces sels en sursaturation, d'où le manque d'efficacité des procédés classiques sur vin rouge. Comme les vins ont en outre des teneurs en tartre variables, la stabilité finale n'était pas garantie.

Puisque la cause du mal était la concentration excessive des vins en ions tartrate, potassium et calcium, il fallait chercher à les éliminer spécifiquement. Dans la méthode d'électrodialyse qui a été retenue, on fait couler du vin entre deux membranes de polymères, en appliquant un champ électrique perpendiculaire à l'écoulement : les ions négatifs sont attirés d'un côté, et les ions positifs de l'autre. Si l'on a choisi des membranes qui laissent spécifiquement passer des ions potassium et calcium, d'une part, et des ions tartrates, de l'autre, on extrait spécifiquement ces ions.

Dans le procédé mis au point, le vin traverse ainsi, en parallèle, un empilement de membranes anioniques et cationiques, ce qui le désionise tout en enrichissant en ions tartrate, potassium et calcium les compartiments latéraux, où l'on fait simultanément circuler une solution de composition contrôlée. Les

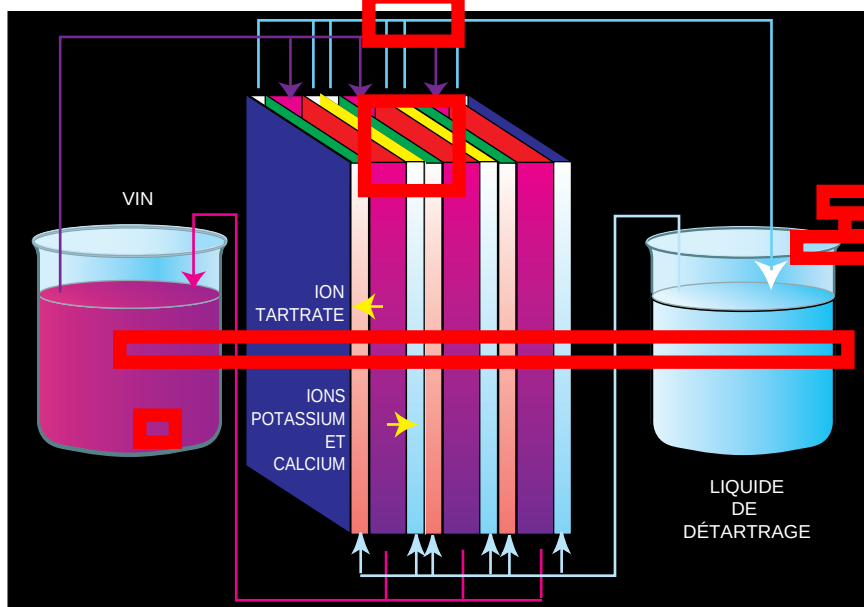
membranes retenues sont des feuilles de 20 centimètres de côté, en polysulfones creusées, espacées de 0,6 millimètre, et le champ électrique appliqué est de un volt par cellule. Les chercheurs ont testé une surface d'échange totale de quatre mètres carrés, assurée par 60 cellules empilées. Ils se sont attachés, par modélisation, à adapter l'intensité du traitement d'électrodialyse à l'instabilité propre de chaque vin. L'œnologue dispose ainsi d'un outil adapté à la plupart des cas.

Pourquoi la nouvelle méthode stabilise-t-elle mieux les vins que la technique classique ? Parce que l'on utilise la conductivité électrique du milieu comme indicateur de la charge du vin en tartre : cette conductivité dépend pour une grande part de la concentration en ions potassium, calcium et tartrate. En réglant le champ électrique et la durée de circulation du vin en fonction de la conductivité de vin, on extrait donc la quantité exacte d'ions nécessaire pour équilibrer les vins, au rythme de un hectolitre par heure environ avec le pilote testé (la vitesse de traitement dépend de l'effet colorant du vin ; on doit ainsi, une fois par jour, faire circuler des agents de nettoyage, qui décrochent des membranes les polyphénols et tanins qui s'y sont attachés).

Le traitement modifie-t-il la qualité des vins ? Cette question primordiale, celle qui intéresse tous les gourmets, fut étudiée au cours de longues et soigneuses campagnes d'essais en Beaujolais, en Champagne, en Bordelais : les œnologues de ces régions ont confirmé qu'il n'observaient aucune différence de qualité gustative entre les vins traités et les vins non traités. Aussi la Société Beccard, en collaboration avec la Société Eurodia, qui produit les membranes, envisage de fabriquer et de vendre des tels détartrateurs... dès que les agréments seront obtenus : les premières expériences étaient conduites sous dérogation publique, mais les chercheurs doivent recevoir une autorisation de Bruxelles dans le premier semestre 1996.

En attendant, les chercheurs continuent d'étudier la valorisation des ions extraits et d'explorer les traitements de vins doux naturels ou d'apéritifs à base de vin, difficiles à traiter par les procédés classiques, à l'aide du froid.

Henri Tave



On stabilise les vins en les faisant circuler entre des membranes sélectives.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science, le 22 janvier 1996, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.

Combien d'emplois perdus ?

Les pays d'Asie du Sud-Est ne sont pas responsables du chômage européen.

Le débat sur les délocalisations des emplois a été lancé en France en 1993 par la publication du rapport du sénateur Jean Arthuis, aujourd'hui Ministre des finances : les importations en provenance des pays à bas salaires, plus particulièrement de l'Est et du Sud-Est asiatique, seraient une cause importante du chômage en Europe. Selon l'étude économique des échanges entre ces deux régions du monde, cette accusation est injustifiée.

Délocaliser signifie fermer un établissement et transférer sa production à l'étranger pour la réimporter. Après une première dérive qui a consisté à nommer ainsi tout investissement à l'étranger, même sans objectif de réimportation, on a désigné sous ce terme l'ensemble des importations de produits manufacturés en provenance de pays à bas salaires. Cet abus de langage a conduit que ces importations seraient organisées par des entreprises françaises ou européennes implantées dans ces pays.

L'Asie n'a, en fait, absorbé qu'un pourcentage infime des investissements européens à l'étranger. Contrairement à une

idée reçue, les entreprises européennes qui s'y sont installées ne sont pas des industries à haute intensité de main-d'œuvre : la plupart ont investi dans les secteurs de l'énergie, de la chimie et de la pétrochimie. On évalue à 400 000 environ les effectifs employés par les entreprises européennes en Asie, alors que les entreprises asiatiques, notamment japonaises, emploient 150 000 salariés en Europe. La comparaison de ces chiffres et du nombre de chômeurs en Europe est éloquent.

EMPLOI ET COMPÉTITIVITÉ

Passons au second volet : les échanges avec les pays asiatiques ont-ils des conséquences sur l'emploi ? Depuis deux ans, le classement du *World Competitiveness Report*, qui s'appuie sur plusieurs centaines de critères, a attiré l'attention sur la compétitivité des pays asiatiques : alors que la France est au treizième rang, Singapour est au deuxième derrière les États-Unis, Hong Kong est au troisième, le Japon au quatrième et Taiwan au onzième. Les bas salaires ne suffisent pas à expliquer ces performances : les nations les plus

compétitives ne sont pas celles dont les coûts horaires sont les plus faibles.

La dénonciation de l'utilisation de main-d'œuvre sous-payée oublie que les bas salaires caractérisent le sous-développement et s'accompagnent souvent d'une faible productivité. Les salaires de l'industrie textile sont 50 fois plus élevés en Allemagne qu'au Viêt-nam, mais la différence de productivité ramène à 3,5 le rapport entre les coûts unitaires du travail. Ces différences de salaires diminuent : le salaire horaire était huit fois plus élevé en France qu'en Corée à la fin des années 1970 ; il n'est que trois fois supérieur en 1994. Des évolutions analogues sont perceptibles à Taiwan, à Singapour et en Malaisie, qui connaissent des pénuries de main-d'œuvre. Faudra-t-il que le sous-emploi disparaisse pour que les salaires augmentent en Chine ? Ce n'est pas sûr. Dans les nouveaux pays industrialisés, les industriels proposent des rémunérations élevées pour fidéliser la main-d'œuvre et les salaires augmentent plus vite que l'on ne s'y attendrait.

Ces pays ont aussi misé sur la qualité des ressources humaines. Les « petites mains » coréennes ou taiwanaises des années 1970 avaient effectué leur scolarité primaire. Aujourd'hui il y a proportionnellement plus de Coréens que de Français à l'université. En revanche, les pays du Sud-Est asiatique, en particulier la Thaïlande, qui n'ont pas accordé la même priorité à l'enseignement, souffrent d'une pénurie de main-d'œuvre qualifiée.

L'étude de la compétitivité privilégie les caractéristiques de l'offre, or la montée en puissance de pays aussi peuplés bouleverse la répartition de la demande mondiale. Dans plusieurs secteurs (l'automobile, les télécommunications, l'énergie, le transport aérien, le tourisme), les pays de l'Est et du Sud-Est asiatique sont les débouchés les plus importants. En 1995, cette région importe des pays européens autant que le continent Nord-américain. La Corée et Taiwan importent ensemble autant que l'Amérique latine.

Les produits asiatiques ne constituent que cinq pour cent des importations manufacturières européennes (23 pour cent aux États-Unis et 36 pour cent au Japon) et les pays européens dégagent des excédents dans leurs échanges avec la plupart d'entre eux, à l'exception de la Chine. Toutefois comme les produits importés incorporent plus de travail que ceux qui nous exportent, le solde en termes d'emplois est déficitaire. Différentes évaluations de ce déficit pour la France varient entre 100 000 et 200 000 emplois. Là encore, on est loin des déclarations les plus alarmistes.

J. Raphaël CHAPONNIÈRE
CNRS, IREPD – Grenoble



Les bas salaires pratiqués dans certains pays asiatiques s'accompagnent souvent d'une faible productivité. Les entreprises européennes y transfèrent peu d'emplois.

De Néandertal à Cro-Magnon

Des hommes de Néandertal vivaient encore en Espagne il y a 30 000 ans.

Les premiers hominidés sont arrivés en Europe il y a au moins 800 000 ans. Une série de dents, des fragments crâniens et mandibulaires, des phalanges, au total 36 pièces fossilisées, exhumées en 1994 dans le site de Gran Dolina, à Atapuerca, en Espagne, ont été récemment datées de cette période. Cette découverte a repoussé de 300 000 ans l'âge des premiers fossiles humains d'Europe. Après plusieurs centaines de milliers d'années d'évolution, ces hominidés ont donné le jour aux hommes de Néandertal. Nos ancêtres, les hommes de Cro-Magnon, ne sont européens que depuis 40 000 ans environ. Ces *Homo sapiens sapiens* ont rencontré et remplacé les Néandertaliens, mais beaucoup moins vite qu'on ne le pensait : leur coexistence aurait duré près de 10 000 ans.

Il y a 35 000 ans, les hommes de Néandertal, artisans, dans l'extrême occident, d'outillage du Paléolithique moyen, le Mous-

térien, ont laissé la place à des hommes de Cro-Magnon. En Europe, ces hommes anatomiquement modernes sont toujours associés à des industries du Paléolithique supérieur. Ils sont porteurs de techniques nouvelles, mais, surtout, d'une révolution culturelle, associée à l'art figuratif et au symbolisme.

Pour la majorité des paléanthropologues, il n'y a pas de continuité entre les deux groupes humains. Leurs arguments sont d'abord d'ordre anatomique : les Néandertaliens ne montrent aucun

signe d'évolution vers les hommes modernes. Ils sont aussi d'ordre stratigraphique : les premiers hommes modernes connus au Proche-Orient sont vieux de 90 000 à 100 000 ans, soit 20 000 ans en Europe. Toutefois les modalités de cette invasion venue de l'Est restaient floues.

La découverte à Saint-Césaire, en Charente-Maritime, d'un Néandertalien vieux de 36 000 ans seulement, dans un niveau Paléolithique supérieur ancien, le Châtelperronien, laissait entrevoir une période de transition où deux groupes s'étaient côtoyés dans le Sud-Ouest de la France. Cette cohabitation aurait même abouti à une acculturation des derniers Néandertaliens. Fruit de contacts plus ou moins réguliers, la fabrication d'objets du Châtelperronien ne résultait que de l'adoption, par les populations locales, de techniques importées. Cela implique, bien sûr, que l'outillage le plus ancien du Paléolithique supérieur en Europe n'est pas le Châtelperronien mais l'Aurignacien, associé aux Cro-Magnons. C'est ce que viennent de confirmer de nouvelles datations effectuées à l'Abri Romani, en Catalogne. Après celles de l'Arbreda, en Catalogne, et du Castillo, en Cantabrie, elles démontrent une pénétration de l'Aurignacien en Europe occidentale dès 40 000 ans.

UN SANCTUAIRE AU SUD

Dans le Sud de la péninsule ibérique, la situation est complètement différente. À ce jour, aucun Paléolithique supérieur ancien n'y est connu. Au contraire, les Néandertaliens semblent y avoir longtemps persisté. Les datations, effectuées au Centre des faibles radioactivités de Gif-sur-Yvette, situent les restes de Néandertaliens découverts à Zafarraya, dans la Province de Malaga, vers 33 400 ans. Dans ce site, les niveaux moustériens les plus récents ont même moins de 30 000 ans. Des résultats similaires ont été obtenus au Portugal, à Columbeira et à Figueira Brava. Les processus de remplacement ont donc été différents suivant les régions. La cohabitation des deux groupes, à l'échelle de la péninsule ibérique, aurait duré 10 000 ans. La supériorité supposée des hommes modernes et de leurs techniques n'était peut-être pas si écrasante.

À l'heure où, dans les gorges de l'Ardeche, des hommes modernes peignaient l'entier du bétail de la grotte Chauvet, dans le creux du territoire européen des Néandertaliens subsistaient, à l'abri de presque toute influence biologique et culturelle moderne. Cette absence apparente d'hybridation soulève de nombreuses

questions sur le statut biologique des Néandertaliens. Une chose est toutefois certaine, le Sud de la péninsule ibérique est une zone refuge et non la porte d'entrée de l'Europe : plus que jamais, c'est bien vers l'Est qu'il faut regarder.

Jean-Jacques HUBLIN,
CNRS-UMR 152, Musée de l'Homme
Cecilio BARROSO-RUIZ,
Grupo de Investigacion 4079, Malaga



Les hommes de Néandertal ont survécu pendant environ 10 000 ans à l'arrivée des hommes de Cro-Magnon dans la péninsule ibérique. Au Sud et à l'Ouest, les sites de Columbeira et Figueira Brava au Portugal, et de Zafarraya, en Espagne, (où cette mâchoire a été découverte) ont livré des outillages néandertaliens, datés autour de 30 000 ans. Au Nord, à El Castillo, à l'Abri Romani et à l'Arbreda, on a retrouvé des outillages de 40 000 ans, caractéristiques des hommes de Cro-Magnon.

Panache fossile

Détection d'une zone chaude sous-continentale : panache fossile ou point chaud en formation ?

Le volcanisme de point chaud (de type hawaïen) résulte de panaches de matériau chaud issus soit du manteau profond (vers 660 kilomètres de profondeur), soit de la frontière noyau-manteau (à 2 900 kilomètres). Ces panaches sont initialement des sphères chaudes qui montent lentement vers la surface tout en étant alimentés par de minces conduits de matériau chaud. Près de la surface, les panaches bombent la croûte en provoquant des séismes et des éruptions volcaniques.

En utilisant les ondes sismiques qui se propagent dans le manteau, John VanDecar, de l'Institut Carnegie de l'État de Washington, et ses collègues ont détecté une région chaude dans le manteau supérieur sous le bouclier sous-continentale Sud-américain. Ils ont naturellement associé cette zone chaude au point chaud de Tristan qui produisit les basaltes du Paraná au Brésil il y a 135 millions d'années. En raison du mouvement des plaques, entraînées par la convection dans le manteau, ce point chaud est maintenant à plusieurs milliers de kilomètres à l'Est du bassin basalitique. Ces chercheurs en déduisent que la région chaude, de 250 kilomètres de diamètre, a été chauffée il y a 135 millions d'années par le passage du point chaud de Tristan et a perduré sous la plaque Sud-américaine.

L'observation d'un contraste de température de 200 °C est expliqué par la diffusion thermique : une différence initiale de température égale à 400 °C sur une zone de 250 kilomètres se refroidit pour donner le contraste de température observé.

En revanche, les mouvements de convection à grande échelle dans le manteau auraient dû étirer et déformer la région chaude. Dans le manteau supérieur, les paramètres physiques de la région chaude et de son voisinage (en parti-

culier la densité et la viscosité) indiquent que la vitesse d'ascension de la zone chaude doit être de 50 kilomètres par million d'années. Dans ces conditions, la panache observée à sa profondeur devrait soit le contraste de densité entre la zone chaude et ses alentours est particulièrement faible, soit le manteau supérieur est, en cet endroit, particulièrement visqueux. De plus, le mouvement vers l'Ouest de la plaque amé-

ricaine aurait dû cisailier l'anomalie qui se serait étendue sur plus de 1 000 kilomètres et n'aurait donc pu maintenir son contraste de température. Afin d'éviter le cisaillement, le manteau à la base de l'anomalie (près de la frontière entre le manteau supérieur et inférieur) doit avoir une viscosité plus faible que ce qui est communément admis.

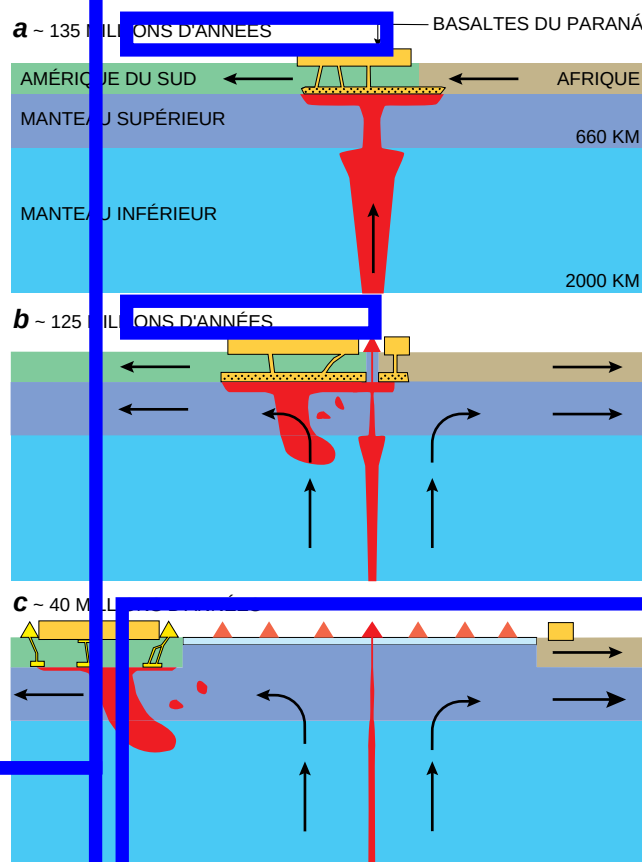
LA TECTONIQUE QUANTITATIVE

Compte tenu de ces restrictions, ne pourrait-on penser que cette anomalie ne soit pas associée au point chaud de Tristan, mais témoigne de la naissance d'un panache se formant en cet endroit ? Là encore, les problèmes d'interprétation subsistent : un point chaud en formation devrait être une tête si grosse qu'elle présenterait plus de sismicité et de volcanisme en surface que ce qui est observé dans la région.

Ainsi, les mesures nous placent devant une alternative. Soit il s'agit d'un panache fossile et nous devons réexaminer les paramètres physiques du manteau supérieur. Selon cette hypothèse, les plaques continentales seraient mues par des courants convectifs mettant en jeu la totalité du manteau supérieur. Soit nous assistons à la création d'un nouveau point chaud. Cette dernière interprétation est moins probable. D'une part, en raison de la faible activité tellurique et, d'autre part, parce qu'il serait extraordinaire qu'un point chaud apparaisse précisément dans la région où le panache de Paraná s'est élevé il y a 130 millions d'années.

Un moyen de discriminer entre ces deux interprétations serait la détection du conduit alimentant la région chaude. Henri-Claude Jafar et ses collègues, à l'École Normale Supérieure, tentent de détecter la présence des conduits par diffraction des ondes sismiques.

La théorie de la dérive des continents est mille fois prouvée. Grâce, entre autres, aux mesures de paléomagnétisme, on reconstitue le cheminement des plaques continentales au cours des temps géologiques. En revanche, la connaissance des forces qui régissent ces déplacements reste limitée. Cette détection est un pas vers une connaissance quantitative de ces forces.



Sections coupant l'Amérique du Sud et l'Afrique (d'Est en Ouest) à différentes époques. (a) Il y a 135 millions d'années, du matériau chaud monte à partir d'un conduit étroit à travers le manteau supérieur. Le matériau s'aplatit en un disque d'environ 700 kilomètres de rayon sous la lithosphère continentale Amérique du Sud-Afrique. La fonte du matériau du panache et d'une partie de la lithosphère produit les coulées basalitiques du Paraná. (b) Il y a 125 millions d'années, les plaques continentales sont entraînées par la convection dans le manteau et l'Amérique du Sud se sépare de l'Afrique. Une région du manteau supérieur, chauffée par le panache, se détache du manteau inférieur et se déplace avec la plaque Sud-américaine. Le point chaud émerge sur la faille médio-océanique qui est en train de s'ouvrir. (c) Il y a 40 millions d'années, le point chaud a produit un chapelet de volcans dans l'Atlantique Sud. Il subsiste du volcanisme tardif du Crétacé au bord du bassin du Paraná (conduits figurés en jaune).

Trop de glutamine

Des protéines contenant des motifs répétés sont responsables de maladies neurodégénératives.

Pourquoi une anomalie génétique déclenche-t-elle une maladie ? Généralement, parce que le gène anormal code une protéine qui ne remplit plus ses fonctions ou que la protéine n'est plus synthétisée. Les anomalies génétiques sont souvent des délétions (des séquences géniques manquent), ou des mutations ponctuelles (une lettre du message génétique est erronée) ; les protéines synthétisées perdent alors leurs propriétés. Une anomalie génétique d'un autre type a été découverte : les protéines anormales contiennent des séquences excédentaires et redondantes, nommées expansions polyglutaminiques, qui leur confèrent de nouvelles propriétés. De telles séquences sont présentes dans la protéine responsable de la maladie de Huntington et dans quatre autres protéines qui déclenchent des maladies neurodégénératives. Avec Alexis Brice de l'Unité INSERM 289, Yvon Trottier, Jean-Louis Mandel et leurs collègues de l'Institut de génétique et de biologie moléculaire et cellulaire, à Illkirch, ont isolé un anticorps qui reconnaît les protéines contenant ces expansions polyglutaminiques, et ils ont montré que deux autres maladies neurodégénératives résultent de la présence de telles expansions. Toutes ces protéines pathogènes contiennent une séquence d'au moins une quarantaine de glutamine, codée par le trinucléotide CAG (C pour le nucléotide cytosine, A pour adénine, G pour guanine, trois des quatre briques constitutives de l'ADN).

Parmi ces maladies, la plus fréquente est la maladie de Huntington, qui touche environ 5 000 personnes, en France ; elle se caractérise par des modifications de l'humeur, des mouvements incontrôlés et une démence. La maladie évolue irrémédiablement pendant une quinzaine d'années. Au cours de cette maladie, les neurones du striatum, qui participent au contrôle du mouvement, dégèrent. Une protéine, la huntingtine, est responsable de la maladie, mais on ignore encore sa fonction, lorsqu'elle est normale. Elle contient un segment de plusieurs acides aminés glutamine ; tant que

le nombre de glutamine n'excède pas 35, la protéine est normale. Dès que ce nombre dépasse 38 (il peut atteindre 100), la protéine anormale déclenche la maladie. Cette maladie est dominante : il suffit que le sujet soit porteur d'un seul gène muté pour qu'il soit atteint. La longueur de l'expansion polyglutaminique augmente souvent lorsque l'allèle anormal est transmis par le père : un enfant qui a un allèle muté d'origine paternelle est parfois atteint à un âge plus précoce que son père.

Une anomalie analogue apparaît dans une maladie rare, la maladie de Kennedy. Commencant à l'âge adulte, elle s'accompagne d'une dégénérescence neuronale, mais, ici, les neurones atteints commandent les muscles squelettiques, les motoneurones. La protéine anormale est le récepteur des androgènes, qui permet aux hormones mâles d'agir. Devant la similitude de l'anomalie responsable de ces deux maladies, les généticiens ont cherché si des expansions polyglutaminiques existent dans d'autres maladies neurodégénératives. Effectivement, c'est le cas dans trois autres pathologies héréditaires rares, dont deux sont des ataxies spinocérébelleuses, dues à une dégénérescence des neurones du cer-

velet. On constate que ces cinq maladies sont d'autant plus précoces que l'expansion polyglutaminique est longue.

Cette mutation ne crée pas des protéines nouvelles fonctionnelles, mais des protéines qui semblent acquérir une fonction nouvelle, responsable de la mort neuronale. Deux questions restent ouvertes : comment les protéines détruisent-elles les neurones ? Pourquoi les protéines anormales ont-elles des cibles spécifiques, alors même qu'elles sont présentes dans tout l'organisme ? Ainsi, la huntingtine anormale agit uniquement sur les neurones du striatum, mais elle est présente dans tout le cerveau ; le récepteur des androgènes est anormal dans tout l'organisme des patients atteints de la maladie de Kennedy, mais seuls les motoneurones sont détruits.

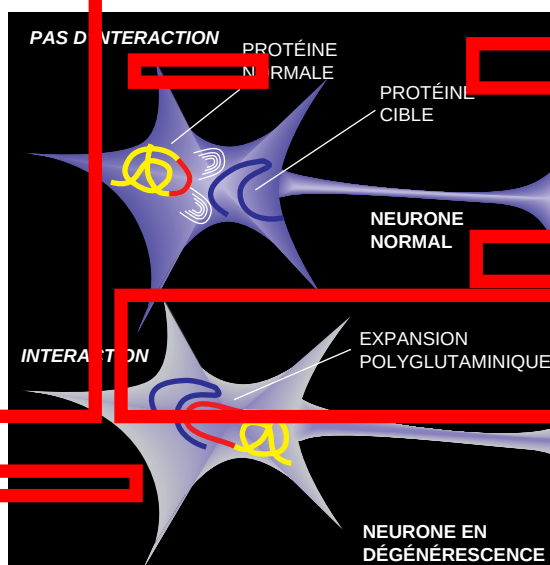
UN ANTICORPS HAMEÇON

L'équipe de J.-L. Mandel a isolé un anticorps qui reconnaît spécifiquement l'expansion polyglutaminique de la huntingtine anormale et des deux ataxies spinocérébelleuses. D'autres séquences identiques ne seraient-elles pas responsables d'autres maladies neurodégénératives, dont on ignore l'origine ? Pour

le savoir, les généticiens ont utilisé l'anticorps pour « pêcher » d'autres protéines polyglutaminées. Effectivement, ils ont découvert deux protéines polyglutaminées, encore inconnues, qui sont responsables de deux autres ataxies cérébelleuses. L'équipe strasbourgeoise tente d'identifier au moyen de cet anticorps d'autres protéines qui déclencheraient des pathologies comparables, d'origine encore inconnue.

Y. Trottier et ses collègues ont montré que, au-delà de 38 groupes de glutamine, la structure des protéines pathogènes se modifie, et que l'expansion polyglutaminique leur confère vraisemblablement de nouvelles propriétés toxiques. Parce que la conformation change, la protéine anormale interagit peut-être avec une cible à laquelle elle n'a pas accès dans la configuration normale.

Par ailleurs, Chris Ross et ses collègues de l'Université Johns Hopkins ont identifié une protéine cible de la huntingtine ; s'ils n'ont pas encore découvert sa fonction, ils ont montré que la force de liaison entre cette protéine et la huntingtine est d'autant plus forte que l'expansion polyglutaminique est longue. L'étude de la protéine cible permettra peut-être aux généticiens de comprendre pourquoi ces expansions sont si nocives. ■



LES EXPANSIONS POLYGLUTAMINIQUES semblent responsables de plusieurs maladies neurodégénératives, parce qu'elles autoriseraient des interactions normalement interdites (en haut) ; en interagissant avec une protéine cible (en bas), les protéines pathogènes déclencheraient la mort neuronale.

Des toxines aux mini-protéines

Les toxines de scorpion ont une structure commune très stable qui sert de plate-forme pour créer de nouvelles protéines.

Depuis une vingtaine d'années, les biologistes savent modifier la séquence et la structure des protéines. Ils tentent désormais de créer des protéines aux fonctions nouvelles, ce que la nature réalise depuis des centaines de millions d'années avec une économie de moyens remarquable. Les protéines du venin de scorpion illustrent cette adaptation : au cours de l'évolution le scorpion a acquis un arsenal de toxines aux cibles et aux séquences étonnamment diverses, mais qui sont stabilisées par un même motif structural. On utilise aujourd'hui cette structure en ingénierie des protéines, car elle constitue une plate-forme de choix pour insérer des sites fonctionnels issus d'autres protéines.

Les toxines du venin de scorpion sont des protéines de petite taille (de 30 à 70 acides aminés) qui bloquent de façon spécifique les canaux ioniques, notamment ceux qui laissent passer les ions sodium et potassium. Grâce à l'effet paralysant dû au blocage de ces canaux, les scorpions immobilisent leurs proies et échappent à leurs prédateurs.

Les toxines des différentes espèces de scorpion agissent sur des canaux ioniques différents, mais présentent un motif structural commun composé d'une hélice α et d'un feuillet β . Ces structures, que l'on rencontre dans la plupart des protéines, sont ici reliées par trois ponts disulfure, des liaisons covalentes qui confèrent à l'ensemble du motif une stabilité remarquable : la structure reste ordonnée, même dans l'eau portée à ébullition ou après traitement par des agents dénaturants. Les seuls acides aminés présents à la même position dans toutes ces toxines sont les six cystéines qui forment deux à deux les ponts disulfure, ce qui indique que la substitution d'acides aminés (sauf les cystéines) dans la séquence de ces protéines ne devrait pas en altérer la structure. Cette «permissivité» du motif α/β , jointe à la petite taille des toxines, à leur stabilité et à la présence de structures typiques des protéines globulaires, en font un support idéal en ingénierie des protéines.

En exploitant ces caractéristiques, notre équipe essaye de donner à ces protéines des fonctions qu'elles n'ont pas

dans la nature. Afin de tester la souplesse de la plate-forme, nous y avons créé un site de liaison des métaux lourds en prenant pour modèle le site de liaison du zinc de l'anhydrase carbonique (dont l'activité catalytique dépend de ce métal). Ce site est formé principalement par trois résidus histidine qui sont les ligands du métal et qui sont stabilisés dans la conformation optimale par d'autres acides aminés. La modélisation moléculaire assistée par ordinateur nous avait indiqué que l'on pouvait recréer ce site dans la région en feuillet d'une toxine de scorpion, la charybdotoxine, en ne modifiant que neuf de ses 67 acides aminés.

Nous avons synthétisé chimiquement cette nouvelle molécule et nous l'avons étudiée par diverses techniques spectroscopiques en présence de différents ions métalliques. Cette analyse détaillée a confirmé que la nouvelle protéine possédait une architecture presque identique à celle de la toxine naturelle de scorpion et que le site introduit possédait exactement la structure attendue. En outre, il liait les métaux avec une grande affinité et présentait des spécificités pour les différents ions similaires à celles de l'anhydrase carbonique.

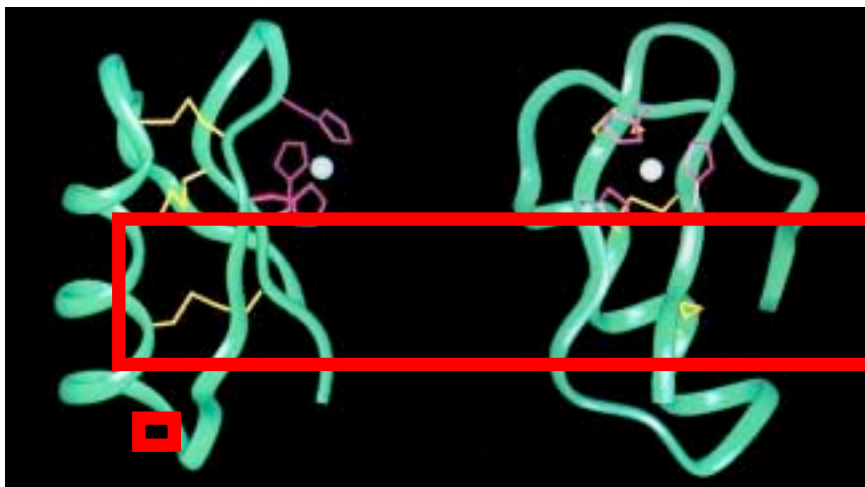
RECÉRÉER DES SITES

Ce résultat prouve la valeur de cette plate-forme pour l'ingénierie des protéines et confirme ses qualités : une grande tolérance quant à l'insertion de nouvelles séquences ; une conformation stable, même après de nombreuses mutations ; la possibilité d'introduire les nouvelles séquences dans des régions à la structure prédéterminée et d'en fixer ainsi la conformation. Sur la base de ces résultats encourageants, nous allons poursuivre l'exploitation de ces plates-formes structurales en y recréant d'autres sites. Ces futures mini-protéines seront facilement produites et offriront des activités intéressantes pour la médecine et l'industrie.

De nouveaux ligands activant ou bloquant les récepteurs neuronaux sont en cours d'élaboration. Nous réalisons également des mini-protéines qui reproduisent la surface d'interaction de protéines vitales avec les protéines cellulaires cibles (par exemple, la protéine gp120 du virus du SIDA et la protéine CD4 des lymphocytes humains), ou celle de protéines responsables de l'adhésion cellulaire avec les protéines de la matrice extracellulaire. Ces mini-protéines, nous l'espérons, deviendront des molécules-pilotes pour la mise au point de nouveaux médicaments.

Claudio VITA

Département d'Ingénierie et d'Étude des protéines – CEA, Saclay



Le squelette protéique d'une toxine de scorpion, la charybdotoxine (en vert, vue latérale à gauche et frontale à droite), est stabilisé par trois ponts disulfure (en jaune). Le motif commun à toutes les toxines de scorpion est composé d'une hélice α (à gauche) et de deux chaînes antiparallèles formant un feuillet β («épingle à cheveux» à droite), sur lesquelles on a recréé le site de liaison du zinc de l'anhydrase carbonique par l'introduction de trois histidines (en rose, atome de zinc en blanc).

Pollution spatiale

Comment protéger les satellites des débris en orbite autour de la Terre ?

Les « tempêtes de météorites » ne sont-elles que de la science-fiction ? La carte établie par Nicholas Johnson de l'Institut des sciences Kamen détaille les 7 800 des plus grands objets de facture humaine – parmi eux, des satellites morts – qui orbitent autour de la Terre. Le ciel ne va pas encore nous tomber sur la tête, mais il se remplit d'obstacles.

Aucun satellite actif n'a encore été endommagé par collision avec ces déchets spatiaux ; néanmoins, le danger est réel. Les vitesses relatives des objets en orbite autour de la Terre atteignent 15 kilomètres par seconde (la vitesse d'une balle de fusil est inférieure au kilomètre par seconde). Un boulon perdu peut détruire un satellite ou mettre en danger la vie des astronautes.

On distingue, suivant leur taille trois catégories de débris. Les petits débris de taille inférieure au centimètre et qui sont indétectables par les techniques actuelles. Les débris « moyens » de taille comprise entre 1 et 10 centimètres, également indétectables, et contre lesquels il est difficile de se prémunir. Enfin, les « gros » objets de taille supérieure à 10 centimètres. La plupart de ces derniers sont répertoriés et leurs trajectoires connues.

Si les débris présentent un risque pour les satellites de haute altitude, dans les zones où les astronautes travaillent (autour de 400 kilomètres d'altitude) le frottement sur les couches supérieures de l'atmosphère fait tomber les débris en quelques mois. Pour les navettes spa-

tiales, les débris en orbite ne constituent pas un danger majeur : les collisions avec des petits déchets sont rares et les gros objets sont esquivés par des manœuvres d'évitement.

En raison de sa taille importante et de sa durée de vie prévue (10 ans), la station spatiale internationale, actuellement en projet sera menacée. Pour pallier le danger, des blindages protégeront les éléments sensibles de la station (modules, zones habitées, etc.) des débris de petite taille. Par ailleurs, à l'instar de la navette spatiale, la station a été conçue pour esquiver les plus gros débris. Il reste les débris moyens, qui, indétectables, constituent un risque faible, mais indéniable.

La densité de débris est maximale entre 800 et 1 500 kilomètres d'altitude. Beaucoup plus haut, sur l'orbite géostationnaire, à 36 000 kilomètres d'altitude, les places sont chères et les satellites risquent d'entrer en collision.

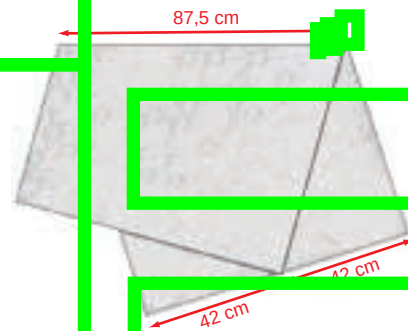
Éliminer la pollution spatiale n'est pas une tâche aisée et il serait souhaitable de ne pas produire de débris. Une source de pollution est la formation des débris résultant de l'explosion de lanceurs : aujourd'hui, on prévient cette pollution en réduisant le nombre des débris et en faisant retomber les étages sur le sol. On nettoie également l'orbite géostationnaire en « réorbitant » les satellites inutiles sur une trajectoire située à 300 kilomètres au-dessus de cette orbite où ils résideront sans constituer une menace pendant des millions d'années. ■

JEU-CONCOURS

N°19

PLIAGE ET GÉOMÉTRIE

L'art du pliage réserve des problèmes délicats. Cette feuille pliée a une largeur de 84 cm, et la longueur du pli vaut exactement 87,5 cm. Le coin est au milieu du petit côté opposé. Quelle est la longueur de la feuille ?



Envoyez vos réponses à *Carla Science*, 8, rue Fénelon, 75006 Paris. Parmi les réponses reçues en janvier 1996, dix gagnants recevront un livre.

RÉPONSE

AU JEU-CONCOURS N°17

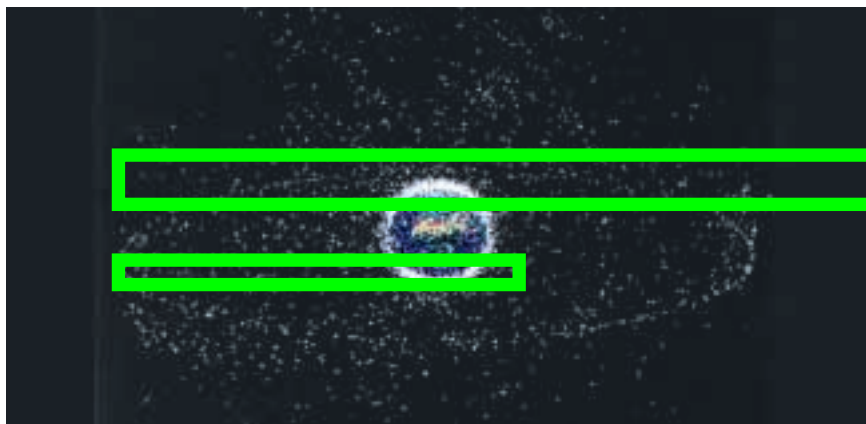
Si un nombre d divise ABC , alors il divise $100A + 100B + C$. De même, divisant BCA et CAB , il divise $100B + 10C + A$ et donc $100C + 10A + B$. Dès lors, d doit diviser :

$$10(ABC) - (BCA) = 10(100A + 10B + C) - (100B + 10C + A) = 999A$$

$$\text{ainsi que } 10(CAB) - (ABC) = 999C \text{ et } 10(BCA) - (CAB) = 999B$$

Cela étant vrai quels que soient les chiffres A , B et C , d doit diviser 999. Soit $d = 1, 3, 9, 27, 37, 111, 333, 999$. Cependant si $d = 111, 333$ et 999 , cela implique $A = B = C$ solutions que l'on peut considérer comme triviales. Il y a d'ailleurs d'autres cas si $A = B = C$, on doit avoir $111A = 111A$, d'où les solutions triviales, 111, 222, 333, ..., 888, 999.

À propos de la grille de nombres croisés du jeu-concours n° 15, la solution est unique si comme cela est dit dans ses définitions tous les carrés étaient différents. En revanche, si l'on enlève cette condition, plusieurs lecteurs ont montré, à l'aide de programmes informatiques, qu'il y avait 136 solutions.



CARTE DES DÉBRIS de taille supérieure à 10 centimètres orbitant autour de la Terre. Les débris ont été grossis pour une meilleure lisibilité.

Du coton «Vert»

La culture de coton naturellement coloré en France.

Les viticulteurs du Languedoc-Roussillon ont le «blues» : ils arrachent 3 000 hectares de vignes par an. Ils pourraient bientôt chanter le «blues», en cultivant du coton grâce au projet lancé par des agronomes du CIRAD de Montpellier. Les producteurs de rouge ne se convertiront toutefois pas au plus blanc que blanc : leur coton sera vert ou marron. L'absence de teinture polluante dans la chaîne de production sera un argument clé de la commercialisation des produits de cette nouvelle filière. En outre, les couleurs se renforceraient plutôt au lavage.

Le cotonnier est un arbuste vivace dont les fruits, les capsules, contiennent des fibres, que l'on file : une seule capsule fournit jusqu'à 30 mètres de fil. Depuis deux siècles, les agronomes ont sélectionné les espèces qui fournissent les meilleurs rendements et les fibres les plus longues possible. Ils ont aussi décoloré le coton : alors que les espèces sauvages produisent des fibres aux couleurs pastel variées, le coton de *Gossypium Hirsutum*, l'espèce la plus cultivée dans le monde, est blanc. Il est facilement teint pour répondre à la demande colorée changeante des industriels et des consommateurs.

Comment colorer le coton en conservant les avantages de *Gossypium Hirsutum*? La couleur des fibres dépend d'un seul gène, qui contrôle la production par la plante d'un colorant de la cellulose des fibres. Les allèles qui produisent des fibres colorées sont tous dominants sur celui qui produit des fibres blanches : si l'on féconde un plant «blanc» avec le pollen d'un plant «coloré», les graines résultantes produisent des plants à fibres colorées. Afin de conserver les autres caractéristiques de l'espèce «blanche», l'hybride ainsi obtenu est utilisé pour féconder à nouveau un plant «blanc», et ainsi de suite jusqu'à la quatrième génération.

L'idée de cultiver du coton en France date vraisemblablement du blocus continental, imposé par Napoléon à la Grande-Bretagne et à ses importations coloniales. Les dernières tenta-



Le coton naturellement coloré rend inutile la teinture. En Languedoc-Roussillon les cultures expérimentales laisseront la place à une production à grande échelle en 1998.

tives remontent aux années 1950. Les espèces utilisées étaient toutefois trop difficiles à cultiver : les rendements n'étaient pas assez réguliers. Le cotonnier ne pousse que si la température extérieure reste supérieure à 12 °C. Il a aussi besoin, au moment de son développement végétatif, d'apports suffisants en eau. En outre, tout au long de la culture il faut maintenir un juste équilibre entre le développement des branches et des feuilles, qui assurent la photosynthèse, et celui des fruits. Les agronomes du CIRAD achèvent aujourd'hui la définition des techniques de culture et des traitements à réaliser. Ils visent un rendement moyen de deux tonnes de coton non égrené à l'hectare.

La production de coton coloré débutera à grande échelle en 1998. Des usines d'égrenage seront construites pour séparer les fibres des graines, et de grandes surfaces seront plantées en cotonniers : 1 500 à 5 000 hectares sont nécessaires pour alimenter une usine. Les producteurs de fil devront aussi promouvoir ce nouveau produit, respectueux de l'environnement, mais plus cher que le coton blanc : aujourd'hui

le kilogramme de coton coloré non égrené coûte environ 25 francs, contre quatre francs pour le coton blanc. Si le coût de la teinture inclut celui de la dépollution, l'écart de prix entre les tissus teints et ceux de couleur naturelle est toutefois faible. Des réglementations anti-pollution établiraient une concurrence équitable entre les deux types de produits. ■

Un contrat de thèse

La clarification des relations entre les doctorants et leur encadrement valoriserait le doctorat.

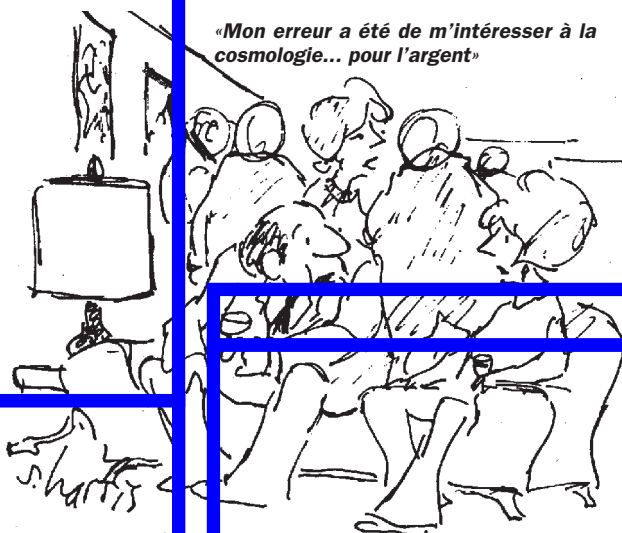
Le doctorat se porte mal. Est-ce une crise de croissance? Le nombre de nouveaux diplômés augmente chaque année, mais pas le nombre d'emplois correspondant à leurs compétences. La valorisation de la formation par la recherche, auprès des employeurs qui la méconnaissent, requiert une clarification de son contenu. La création d'un contrat de thèse réglant les droits et les devoirs du doctorant et du directeur de thèse le permettrait. Ce contrat, qui engagerait aussi l'université, décrirait la formation acquise pendant la préparation de la thèse : il faciliterait l'insertion des docteurs dans le monde professionnel non académique.

Environ 9 000 doctorats ont été soutenus en 1993. Le nombre d'emplois offerts correspondant à cette qualification atteint à peine 7 000 : 3 000 dans l'enseignement supérieur et la recherche, 1 100 dans le secteur privé, 1 000 dans l'enseignement secondaire et les administrations, et 1 400 dans les pays d'origine des docteurs étrangers. En outre, environ 2 500 docteurs sont actuellement en stage postdoctoral à l'étranger. Ils reviendront un jour chercher un emploi en France. Les universités françaises produisent un «surplus» annuel de 1 500 à 2 000 docteurs, près de 20 pour cent. Que deviendront-ils? C'est la survie même du système de formation par la recherche qui est menacée par cette inadaptation.

Paradoxalement, les besoins en docteurs existent. Pour les universités, les étudiants des premier et second cycles l'ont fait savoir ces dernières semaines en réclamant plus d'enseignants. Les grandes entreprises, ainsi que les PME, sont encouragées, au moins verbalement, à innover et à faire de la prospective pour maintenir et développer leur compétitivité internationale. Dans son rapport annuel sur l'évaluation de la politique nationale de recherche et de développement techno-

logique publié en septembre 1995, le Conseil supérieur de la recherche et de la technologie affirme que l'effort de formation doctorale doit être maintenu.

Dans ce contexte, que peut faire la communauté scientifique? Réclamer des créations de postes peut être amélioré. La qualité de la formation par la recherche sans doute. La définition du sujet de recherche, l'indisponibilité ou la démotivation de l'encadrement, l'absence d'insertion dans la vie sociale et scientifique du laboratoire et l'absence de relations avec le monde extra-académique pénalisent le doctorant et engen-



drent des gaspillages d'argent et de ressources humaines.

Un contrat de thèse, qui lierait le doctorant, le directeur de thèse et le directeur du laboratoire au travers d'un projet scientifique cohérent et clair, remédierait à ces dysfonctionnements et valoriserait la formation auprès des entreprises. Ce contrat préciserait le sujet de la thèse, sa place dans le projet scientifique du laboratoire, son caractère novateur, ainsi que les éventuels partenaires industriels. Le laboratoire indiquerait les moyens de travail alloués au doctorant, les attentes à son égard et les possibilités d'enseignement et de formation pédagogique.

UNE JUSTE RÉMUNÉRATION

La préparation d'un doctorat est une activité professionnelle à plein temps : le doctorant doit être financé et disposer d'une couverture sociale complète. Le contrat de thèse préciserait le montant du salaire ou de l'allocation, ainsi que les droits sociaux. Sur ce chapitre des droits, les modalités de représentation des doctorants au sein des instances locales (conseil de laboratoire, conseil scientifique) devraient être clarifiées.

Le contrat s'achèverait par la soutenance de la thèse et l'obtention du diplôme, ou par l'abandon avant terme. Dans le premier cas, la soutenance serait décidée par le directeur de thèse en accord avec tous les signataires du contrat. Celui-ci serait complété par les rapports scientifiques, le mémoire de

thèse, la description des formations complémentaires et les éventuels autres diplômes obtenus. Le contrat décrirait alors complètement le doctorat. En cas d'abandon avant terme, les cosignataires en partageraient la responsabilité. Les motifs de cette rupture seraient fournis, indépendamment, par les différentes parties, au responsable de la formation doctorale.

Pour améliorer les conditions d'encadrement, la limitation du nombre de doctorants simultanément encadrés par un même chercheur habilité est nécessaire. La formalisation de la présence d'un doctorant au sein d'un laboratoire par la signature d'un contrat le favoriserait et permettrait d'inclure la contribution à la formation dans l'évaluation des chercheurs et des unités de recherche.

Pour prévenir et gérer les éventuels conflits, un médiateur, ou parrain, extérieur au laboratoire, cosignerait le

contrat de thèse. Il responsabiliserait aussi le doctorant sur son projet de carrière. Le recrutement de parrains issus du milieu industriel serait une étape de plus vers l'amélioration du transfert de docteurs vers le secteur privé, non nécessairement lié à la recherche.

William El Kaïm
doctorant à l'Université Paris 6
membre du groupe Hot-Docs

Ces réflexions résument des propositions du rapport Hot-Docs. Le groupe Hot-Docs a une adresse sur Internet : <http://www-masi.ibp.fr/guilde>

Les jaunes du Moyen Âge

On répertorie les plantes qui étaient utilisées pour teindre la laine et la soie en jaune en Europe méditerranéenne, au xv^e siècle.

Quelles matières colorantes les teinturiers utilisaient-ils pour teindre les tissus en jaune, à la fin du Moyen Âge ? La question est difficile, car la plupart des plantes contiennent des pigments jaunes. Chaque corporation aurait-elle alors sélectionné les matières végétales les plus accessibles, dans son environnement immédiat ? L'«archéoteinturière» Dominique Cardon, du CNRS de Lyon, a montré l'importance du commerce : les teintures jaunes les plus résistantes à la lumière étaient vendues à travers l'Europe.

L'idée de préférences locales dans le choix des teintures jaunes anciennes reste attrayante, car elle laisse penser que l'on pourrait mieux déterminer l'origine des tissus anciens si l'on connaissait les méthodes d'obtention de leurs jaunes. L'analyse chimique des teintures jaunes décèle souvent la présence de lutéoline, une flavone initialement observée dans la gaude (*Reseda luteola* L.). Bien que cette plante ait sans doute été la plus utilisée en Europe, pourquoi n'a-t-on pas retrouvé les autres colorants mentionnés dans les documents techniques anciens ? D. Cardon s'est asso-

ciée à Claude Andary et ses collègues de la Faculté de Montpellier, afin d'analyser quelque 40 recettes de teinture jaune pour la laine et la soie retrouvées dans des documents italiens, français ou espagnols de la fin du Moyen Âge.

L'étude des recettes italiennes a immédiatement donné deux résultats importants. D'une part, les matières pour teindre en jaune étaient utilisées non seulement pour la réalisation de divers jaunes, mais aussi pour l'obtention d'orange, de verts, de bruns... D'autre part, cinq plantes sont fréquemment mentionnées par les artisans médiévaux. Restait alors le difficile problème d'identification de ces plantes, qui étaient désignées par des noms vernaculaires. La recherche croisée dans les sources

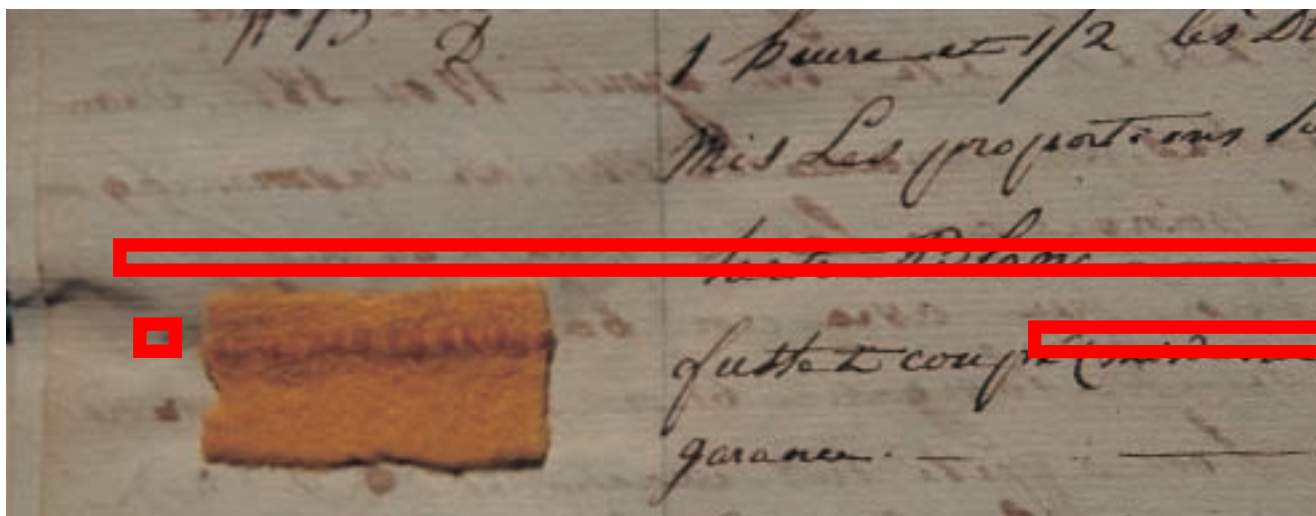
historiques a permis d'identifier la gaude, le safran, le fustet et la genestrolle ; une plante nommée *giuletta*, dans les textes anciens, reste à identifier. Plus paradoxalement, la gaude, qui possède d'excellentes propriétés colorantes jaunes, est plutôt utilisée pour faire des verts. Le fustet venait souvent de Provence et, notamment, du mont Ventoux ; il était exporté vers l'Italie, en passant par Pise.

L'usage de safran, sans mordant, pour la teinture jaune de la soie est étonnant, car cette matière est très coûteuse.

Le cas de l'Espagne et du Midi est plus complexe, car on n'a pas retrouvé de manuel de teinture, ni de livre de recette locales. On possède cependant de nombreux règlements médiévaux qui indiquent précisément les pratiques de teinturerie dans ces régions. En Espagne, les registres commerciaux montrent toutefois que la gaude avait une importance particulière, puisque son prix était réglementé. En Languedoc, plusieurs espèces, telles le trintanel (un daphné) et plusieurs *Thymeleaceae*, poussent en abondance dans les garrigues, faisant concurrence à la culture de la gaude. À l'époque, s'opposait donc un savoir technique, qui connaissait les propriétés colorantes supérieures de la gaude, et des pratiques locales qui utilisaient le trintanel, la sarrette et la genestrolle.

L'étude historique est complétée par des analyses chimiques. L'équipe de Montpellier a d'abord mis au point une méthode d'analyse appropriée (la chromatographie bidimensionnelle en couche mince) au type de molécules teintantes (les flavonoïdes), puis elle a comparé les plantes et des échantillons de tissus anciens. On a ainsi observé que deux flavonols, formant des teintures particulièrement stables à la lumière sont présentes dans la gaude : la lutéoline, que l'on connaît aussi, et aussi un dérivé glucosylé

de cette molécule (une grosse molécule composée de la flavone et d'un sucre) ; la sarrette est également riche en lutéoline, qui est à l'origine de ses remarquables propriétés colorantes ; elle contient également la 3-méthylquercitrine, qui pourra, elle, être utilisée comme marqueur de la plante. Les autres plantes utilisées au Moyen Âge en Europe méditerranéenne sont en cours d'étude. ■



Page du Livre de teinture de Casimir Maistre, 1817. Échantillon de drap teint au fustet, en face de la recette correspondante.

Les excès de la pêche en mer

CARL SAFINA

Les poissons disparaissent des océans parce qu'ils sont trop pêchés. La pêche industrielle moderne devra modifier ses techniques si elle veut subsister.

Le zoologiste Jean-Baptiste Lamarck est connu pour sa théorie – erronée – de l'hérédité des caractères acquis, mais moins pour ses idées sur la pêche : «Les espèces vivant dans les océans ne sont pas menacées par l'homme. Leur abondance est telle qu'aucune espèce n'est réellement menacée.» Ce qui était vrai à l'époque de Lamarck ne l'est plus aujourd'hui où les techniques de pêche industrielle épuisent les réserves de poissons. L'aveuglement des professionnels de la pêche a provoqué la raréfaction de plusieurs populations d'espèces marines ; elle a perturbé les écosystèmes marins et appauvri de nombreuses communautés littorales. Cette politique de profit à court terme coûte des milliards de francs aux entreprises et aux contribuables, et elle menace les ressources alimentaires des pays en développement. Personne n'a mesuré les conséquences d'une pêche à grande échelle de ces populations naturelles.

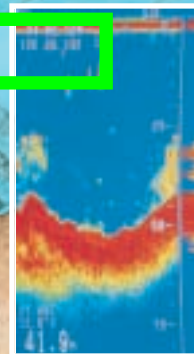
LES LONGS FILETS DÉRIVANTS sont interdits, mais continuent d'être utilisés, piégeant d'innombrables espèces en plus des poissons recherchés.

LE CHALUTAGE À DEUX BATEAUX (ou chalutage «en bœufs») est interdit dans certaines zones, car cette méthode de capture est trop efficace.

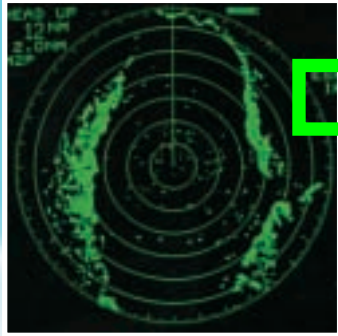


1. LES POISSONS DE MER sont menacés par la pêche industrielle et par la dégradation de leur habitat naturel.

LE SONAR détecte les bancs de poissons par la forme caractéristique de l'écho qu'ils renvoient.



LA DÉFORESTATION, qui favorise l'érosion du sol, près des côtes, libère des sédiments qui envahissent parfois les petits cours d'eau et les habitats coralliens fragiles.



LE RADAR permet aux navires de naviguer et de pêcher par temps de brume.

DES SUBSTANCES TOXIQUES contenues dans les effluents urbains ou agricoles polluent la mer et apportent un excès de substances nutritives ; ces dernières sont responsables de la prolifération du phytoplancton et d'un déficit en oxygène dans l'eau.

LE THON ROUGE est si recherché que les pêcheurs utilisent des avions pour guider les bateaux.



LES MANGROVES CÔTIÈRES où se développent les alevins sont souvent détruites pour les besoins de l'aquaculture.

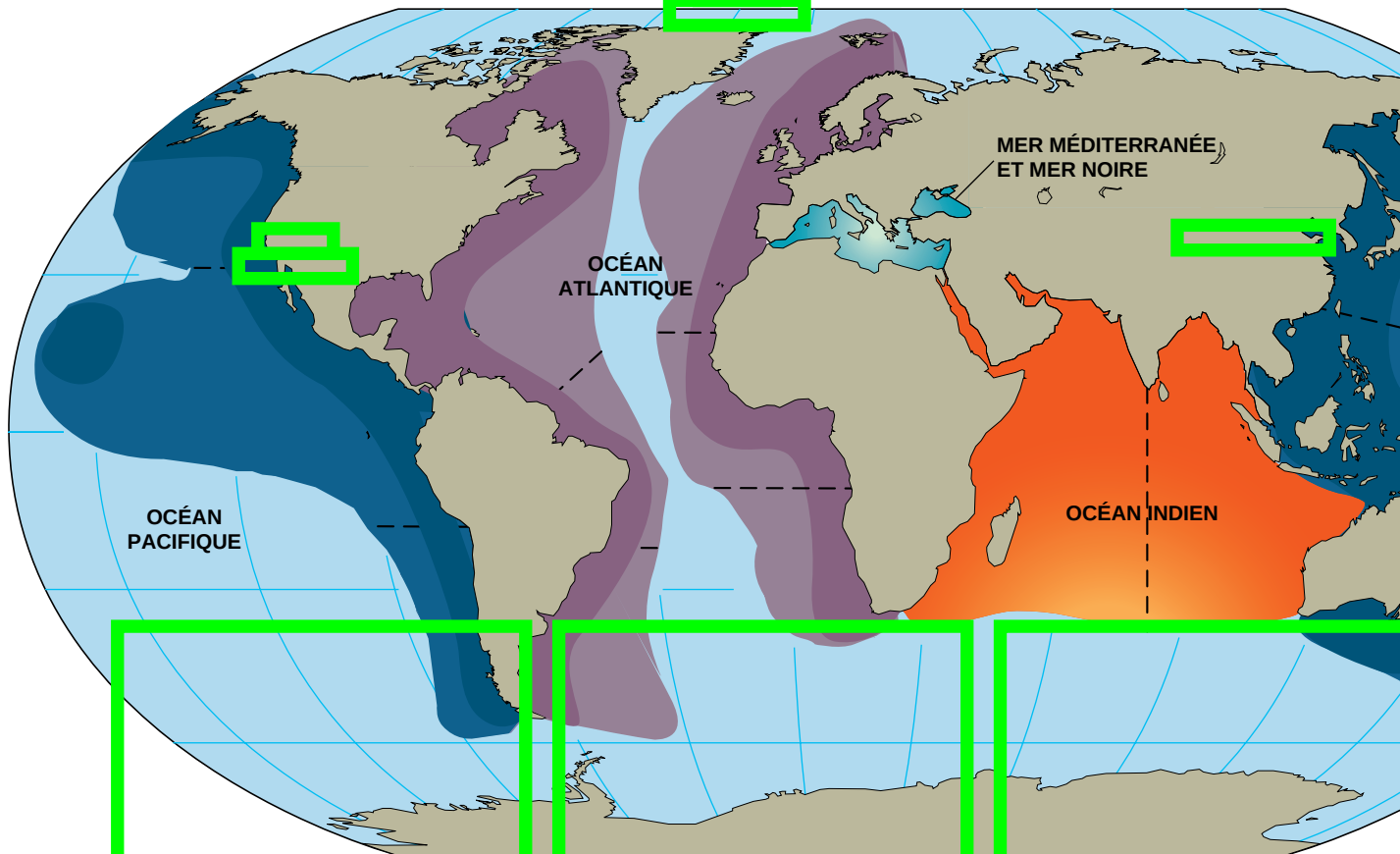


LE POSITIONNEMENT PAR SATELLITE permet aux bateaux de se rendre sur les zones de rassemblement et de reproduction des poissons.

DES LIGNES FLOTTANTES, des palangres, mesurant jusqu'à 150 kilomètres sont équipées de milliers d'hameçons ; menacées, elles capturent souvent des espèces protégées.



Les principales zones de pêche dans le monde : l'évolution des prises



Comme les capacités de renouvellement des populations sauvages sont déterminées par des facteurs naturels, la pêche visant à augmenter l'approvisionnement devra, tôt ou tard, être limitée. Dans l'Atlantique, la Méditerranée et le Pacifique, les captures diminuent déjà. À l'échelle mondiale, les prises de pêche ont culminé à 82 millions de tonnes en 1989; depuis, la croissance a cédé la place à une stagnation, voire au déclin.

Dans certaines zones où les captures avaient été maximales au début des années 1970, la production a diminué de plus de 50 pour cent. De surcroît, certains des plus grands lieux de pêche mondiaux, tels les Grands Bancs de Terre-Neuve ont été interdits de pêche, en raison de l'effondrement des stocks de poissons : les ressources sont considérées comme épuisées.

Face à ces bouleversements, la section agro-alimentaire des Nations unies (la FAO) qui, il y a dix ans seulement, encourageait l'expansion de la pêche industrielle, a récemment conclu que les rythmes de pêche ne pouvaient pas être maintenus : l'environnement

marin et les économies fondées sur ces ressources naturelles sont menacés. En même temps, en avril 1995, l'Académie des sciences a déclaré que les activités humaines avaient provoqué des diminutions drastiques de plusieurs espèces de poissons parmi les plus appréciées; la faune et la flore marines ont été si perturbées que les écosystèmes marins sont en danger. La pêche n'est qu'une des activités humaines qui menacent les océans, mais c'est certainement la principale.

La guerre du poisson

Les menaces qui pèsent sur les océans sont plus graves que celles qui touchent le milieu terrestre : ainsi la majorité des plateaux continentaux peu profonds a-t-elle été dévastée par la pêche, tandis que les fonds abyssaux, qui étaient

principalement encore intacts. Pour ceux qui vivent des ressources marines, le bilan est dramatique.

Comment un tel effondrement des ressources marines s'est-il produit? Pendant les années 1950 et 1960, de nouvelles techniques de pêche sont apparues : les radars ont permis aux bateaux de naviguer sans visibilité, et

les sonars de détecter les bancs de poissons profonds. Les aides électroniques à la navigation et les dispositifs de positionnement par satellite ont permis aux marins de quadriller la mer avec une précision telle que les navires repèrent les sites où les poissons se concentrent pour la reproduction. Les bateaux reçoivent les cartes météorologiques obtenues d'après les observations satellitaires; ils connaissent ainsi la position des fronts thermiques, où migrent les poissons. Dans certaines pêcheries, des avions d'observation localisent les bancs de poissons et guident les navires.

Beaucoup de navires de pêche industrielle sont équipés de 150 kilomètres de lignes sous-marines garnies de milliers d'hameçons, de chaluts qui pourraient contenir 12 avions ou de filets dérivants de 75 kilomètres.

La pêche industrielle est si efficace que 60 à 80 pour cent du stock disponible est capturé chaque année.

Durant les 20 dernières années, les poissons les plus appréciés ont été prélevés plus rapidement qu'ils ne se reproduisent. Aussi les pêcheurs se sont-ils tournés vers des espèces de

Des politiques irresponsables

Si la situation est si catastrophique, pourquoi trouve-t-on encore du poisson, et souvent à un prix raisonnable, dans la plupart des pays industrialisés? Le prix des produits de la mer a augmenté plus vite que celui du poulet, du porc ou du bœuf, mais le cours de la viande limite celui du poisson : le consommateur se tournerait vers d'autres produits carnés si le poisson devenait trop cher. L'augmentation du prix des poissons est donc limitée par l'importation de poissons,

par les pêches intensives (tant qu'elles ne s'effondrent pas), et par l'aquaculture. Par exemple, à la suite du déclin de nombreuses populations naturelles, on a commencé à élever des crevettes, ce qui a permis de maintenir les prix.

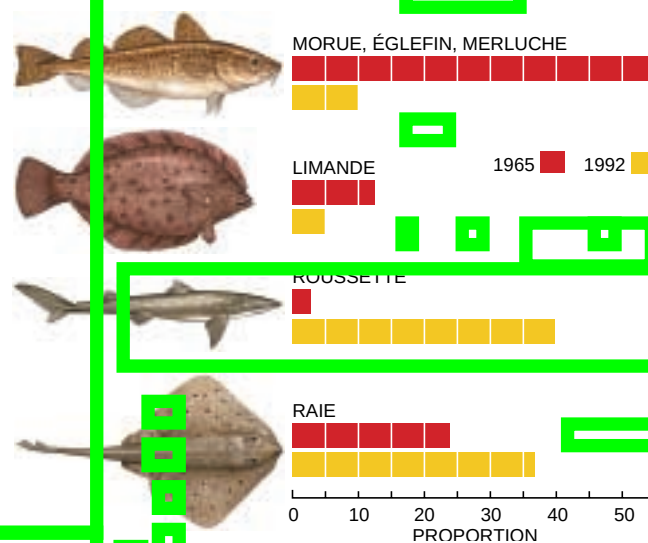
Ainsi, la loi de l'offre et de la demande détermine partiellement le prix du poisson, mais aucune loi ne stipule que la pêche doit être rentable. Pour pêcher 350 milliards de francs de poissons, l'industrie halieutique mondiale dépense 20 milliards par an, et l'essentiel du déficit de 270 milliards de francs est comblé par diverses subventions : dégrèvements fiscaux, subventions directes, soutien des prix, prêts à faible taux d'intérêt et financement des infrastructures par des fonds publics. De nombreux gouvernements accordent des aides massives pour préserver l'emploi, sans se préoccuper de la gestion des ressources.

Ces mesures ont encouragé les investisseurs à financer plus de navires de pêche que les ressources marines ne pouvaient en supporter. Entre 1970 et 1990, la flotte mondiale de pêche industrielle a augmenté plus vite que le tonnage des prises (le nombre et le tonnage des navires a doublé). À elle seule, la moitié de cette armada aurait suffi à extraire ce que les océans peuvent produire chaque année. Cette situation de surcapitalisation est paradoxale : les pêcheurs

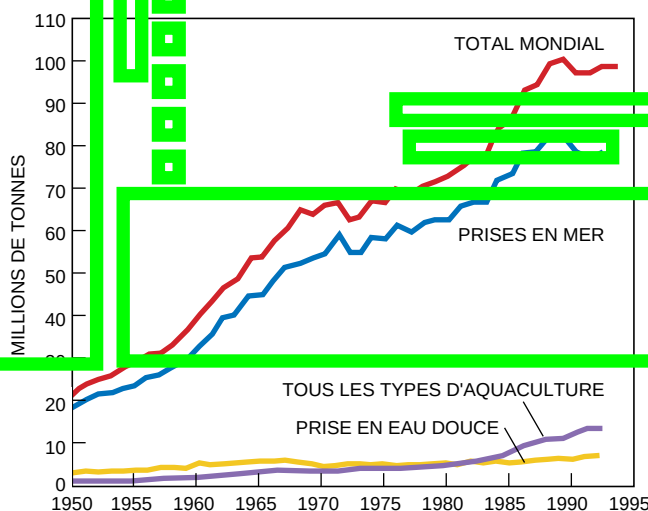
auraient pu attraper autant de poissons sans navires supplémentaires. Une étude a montré que le bénéfice annuel de la pêche à la limande américaine pourrait passer de 0 à 30 millions de francs si l'on retirait plus d'une centaine de bateaux.

Épuisant les stocks disponibles, le suréquipement des flottes fait que le prix de revente des bateaux s'effondre, leurs propriétaires, qui ne peuvent rendre leur capital sans perdre de l'argent, doivent continuer à pêcher pour rembourser leurs emprunts et rester dans un piège économique.

Ils exercent souvent de fortes pressions politiques, afin que les gouvernements ne réduisent pas les quotas de pêche.



4. L'ABONDANCE relative des espèces les plus communes du golfe du Maine, au Nord-est des États-Unis, a été notablement perturbée en raison de la surpêche. Les barres indiquent l'abondance de chacune des espèces en 1965 (en rouge) et en 1992 (en jaune).



5. L'AQUACULTURE produit de plus en plus de poissons, tandis que les tonnages de la pêche en mer (qui fournit l'essentiel de la production) diminuent depuis 1989. Le total mondial des prises (en mer, en eau douce et provenant de l'aquaculture) stagne, voire diminue, depuis cette date.

Ce mécanisme est décrit dans le rapport de l'Organisation des Nations unies reconnaît qu'en encourageant la pêche des subventions trop élevées finissent par créer une situation grave tant pour l'économie que pour l'environnement.

La faim mondiale croissante

Alors que la production halieutique décline, la population humaine mondiale s'accroît, chaque année, d'environ 100 millions de personnes, près du double de la population de la France. Pour maintenir le rythme actuel de consommation, il faut continuer à produire, vers 2010, environ 20 millions de tonnes supplémentaires de produits de la mer chaque année. Pour y parvenir, la production de l'aquaculture devra doubler dans les 15 années à venir, et les populations sauvages de poissons devront être restaurées.

Les innovations technologiques pourraient aussi aider à produire des aliments pour l'homme avec des espèces habituellement réservées au bétail. Toutefois, même si tous les poissons destinés à l'alimentation animale (un tiers des prises mondiales) étaient consommés par l'homme, la demande ne serait couverte que pendant 20 ans. Ultérieurement, une simple amélioration de la gestion des stocks de poissons ne suffira pas à couvrir les besoins d'une population en expansion. Au siècle prochain, les océans ne pourront plus satisfaire les besoins de l'humanité en produits de la mer.

Pour gérer au mieux cette ressource limitée, une bonne connaissance de la biologie et de l'écologie marines sera indispensable. Néanmoins, les défis ne demeureront lorsque l'on verra passer de la connaissance scientifique à la formulation de politiques adaptées, et de mesures opérationnelles. Jusqu'à présent, les gestionnaires des pêches et les responsables politiques

ont négligé les diverses évaluations des stocks fournies par les experts internationaux.

Lorsque des quotas ont été établis, certains pêcheurs ne les ont pas respectés. De 1986 à 1992, les navires de haute mer pêchant dans la zone internationale des Grands Bancs, au large

du Canada, ont pêché 16 fois les quotas définis par l'Organisation des pêches de l'Atlantique du Nord-Ouest pour la morue, le limande et le sébaste. Il y a un an, lorsque les autorités canadiennes ont arraisonné un navire espagnol à proximité des Grands Bancs, ils ont trouvé deux livres de bord, un où

les marins consignent les prises réelles et un autre, falsifié, destiné aux autorités. Ils ont également découvert des filets aux mailles trop petites et 350 tonnes de jeunes limandes noires. Aucun des poissons ramontés à bord n'avait atteint sa maturité sexuelle et ne s'était donc reproduit. Un tel mépris égoïste des

La situation en Europe

Les ressources halieutiques européennes n'ont hélas pas échappé à la surexploitation. En mer du Nord et à l'Ouest de l'Écosse, la biomasse des géniteurs de morues, d'églefins et de lieux noirs a été divisée par trois depuis la fin des années 1970 (le had-dock est de l'églefin fumé). À la suite de la fermeture de la pêche aux harengs en 1977, après l'effondrement du stock, la biomasse s'était rétablie, mais elle tend à chuter à nouveau depuis la reprise de la pêche ; la biomasse de merlus s'est effondrée dans les eaux ibériques et le stock du golfe de Gascogne est en baisse.

Ces espèces peuvent vivre plus de 20 ans, mais la proportion des individus de plus de dix ans est désormais infime. Avec la baisse des stocks de géniteurs, le nombre de juvéniles produits chaque année diminue. Cette spirale risquée d'entraîner l'extinction commerciale, voire biologique, des pêcheries.

Comme partout dans le monde, une pression de pêche disproportionnée vis-à-vis des capacités de renouvellement des ressources, ainsi que des pêches insuffisamment sélectives, conduisant à ces captures excessives de juvéniles, sont responsables de la diminution des stocks. Ainsi, en mer du Nord, une morue de un an a moins de 2 chances sur 100 de survivre jusqu'à l'âge de première reproduction et dans le golfe de Gascogne, près de 80 pour cent des merlus capturés chaque année sont immatures.

On assiste à une dégradation de la situation avec l'image sensationnelle de navires-usines, de satellites, d'avion, etc. La réalité est plus triviale. En Europe, la majorité des navires est de type artisanal (le patron est propriétaire), ce qui n'exclut pas qu'ils puissent dépasser 30 mètres de longueur. Bien sûr, la plupart utilisent radar, sondeur et autres appareils élec-

troniques. Ces navires se comptent par milliers, sortent jusqu'à 300 jours par an et emploient des engins susceptibles de capturer la plus vaste gamme possible d'espèces de toutes les tailles. Au total, le potentiel de capture est considérable et excède ce que les ressources peuvent produire annuellement. En outre, plus les rendements baissent, plus les pêcheurs augmentent l'effort de pêche, réduisant la sélectivité de leurs engins et se contentant de leur rendement. Totale négligence, la poursuite de la fuite en avant ne fait que dégrader les ressources et les comptes d'exploitation. Dès lors que les pêcheurs s'y engagent l'un après l'autre, c'est la catastrophe assurée pour tous.

Depuis dix ans, et même davantage, les scientifiques n'ont pas manqué de mettre en garde les gouvernements. Les effets néfastes à long terme, tant économiques que biologiques, de l'excès d'effort de pêche, de pêches non sélectives et de certaines subventions, ont été soulignés à maintes reprises. Tous les ans, les scientifiques dressent un état des principaux stocks et recommandent les mesures pour arrêter leur déclin.

Or pour reconstituer les ressources marines, l'homme ne dispose que d'un moyen : réduire la pêche. Que l'on y procède en diminuant les captures ou l'effort, ou en augmentant la taille des mailles, le premier effet est la réduction temporaire de la production. Obnubilés par le court terme, pêcheurs et gouvernements utilisent tout argument dilatoire pour éviter ce coût immédiat. La détérioration des stocks doit être patente pour que des mesures soient prises, et il y a loin entre les déclarations officielles et la réalité des pratiques.

Les pêcheurs français réalisent plus de la moitié de leurs captures dans les eaux d'autres pays européens et pâtissent de la dégradation générale. Plus surendettés que leurs voisins, ils ont durement ressenti la crise. En dépit de la diminution des stocks, la pêche artisanale a fait l'objet d'un plan de modernisation au cours des années 1970 et 1980. En moyenne, plus de 50 pour cent des navires de 12 à 25 mètres ont été construits chaque année (avec un pic de 18 en 1986) dans des conditions financières étonnantes : un autofinancement de moins de dix pour cent, complété par des subventions européennes, nationales ou régionales et des prêts à taux bonifiés, pour des unités coûtant jusqu'à 10 millions de francs. Les patrons doivent faire face à des remboursements énormes qu'ils doivent à pêcher toujours plus. Survenant dans une situation déjà difficile, malgré le soutien continu de l'État, la chute des cours du poisson, consécutive à l'ouverture des marchés, mais aussi la récession et au chômage en France a précipité la crise.

Le marasme a gagné aussi les autres professions de la filière. En ce début d'année, des commissions examinent les comptes de plus de 600 navires en difficulté. Un étalement des dettes et des aides publiques supplémentaires permettront à certains bateaux de rester en activité, mais beaucoup devront être désarmés. Accordées à tort ou à raison (en l'absence de mailles, des filets et des quotas, par exemple), les aides publiques n'ont fait qu'accroître les difficultés et renforcer l'épuisement des ressources. Au nom de la paix sociale au jour le jour, des décennies de laxisme ont abouti à la ruine du secteur et à des drames sociaux dans les régions littorales.

Benoît MESNIL
IFREMER - La Rochelle-L'Houmeau

L'efficacité de l'inefficacité

La pêche ne représente que un pour cent de l'économie mondiale, mais, dans certaines régions, la survie des populations en dépend. Les produits de la mer contribuent plus à l'apport mondial de protéines que le bœuf, les volailles ou les autres animaux. La pêche étant libre et accessible même à ceux qui ne possèdent pas de terres, elle est, dans les pays en développement, l'activité de dernier recours. De par le monde, 200 millions de personnes environ vivent de la pêche. Dans la seule Asie du Sud-Est, on dénombre plus de cinq millions de pêcheurs à plein temps. Au Nord du Chili, 40 pour cent de la population vivent des ressources de l'Océan. À Terre-Neuve, la pêche et les industries dérivées assuraient la quasi-totalité de l'emploi, et l'effondrement de la pêche à la morue au début des années 1990 a laissé des dizaines de milliers de personnes sans emploi.

On prétend souvent que préservation de l'emploi et conservation des ressources naturelles sont incompatibles, mais la restauration des populations de poissons créerait des emplois : si on laissait les espèces épuisées se multiplier, leur exploitation bien gérée à long terme augmenterait le produit national brut des États-Unis de 4 milliards de francs et créerait 300 000 emplois. Si les populations de poissons étaient reconstituées et bien gérées, les prises mondiales augmenteraient d'environ 20 millions de tonnes par an. Toutefois, la restauration de l'équilibre écologique, des profits et de la viabilité économique des pêches nécessitera une réduction notable de la capacité de pêche globale, seul moyen de rétablir la productivité des stocks.



réglementations a contribué à la ruine des pêches de Terre-Neuve.

Selon l'Organisation des Nations unies, 70 pour cent des poissons, des crustacés et des mollusques comestibles doivent absolument être préservés, et pourtant la gestion des pêches ne semble efficace dans aucun pays. La coopération internationale est encore plus difficile à établir : lorsqu'un

pays refuse les restrictions imposées par l'accord international, il n'y a rien d'autre, tout simplement.

En 1991, par exemple, plusieurs pays avaient consenti à réduire le nombre d'espadons pêchés dans l'Atlantique ; l'Espagne et les États-Unis se sont soumis aux limitations (les prises autorisées ne représentaient que 85 pour cent de celles de 1988), mais les prises japonaises ont augmenté de 70 pour

cent, celles du Portugal de 128, et celles du Canada ont presque triplé. La Norvège a décidé de poursuivre la pêche du petit rorqual malgré un moratoire international. La pêche du petit rorqual par les Japonais, pour des motifs prétendument scientifiques, produit une viande destinée à la consommation et approvisionne un marché qui encourage une pêche illégale de la baleine.

Les prises accessoires

Dans presque toutes les opérations de pêche, on capture involontairement des espèces marines, collectivement nommées les prises accessoires, ou incidentes. À l'échelon mondial, un animal sur quatre capturé dans les pêcheries commerciales n'est pas recherché, et les pêcheurs le rejettent à la mer.

Ces prises accessoires comprennent surtout des espèces sans valeur commerciale ou des poissons trop petits pour être vendus. En 1990, les filets dérivants en ont capturé plus de 42 millions d'animaux sans valeur pour les pêcheurs, tels des oiseaux et des mammifères marins. Devant ces pertes massives, l'Organisation des Nations unies a interdit les filets dérivants de grande taille (plus de 2,5 kilomètres), mais l'Italie, la France et l'Irlande ont continué à les utiliser pendant un temps.

Dans certaines zones côtières, des



6. AU JAPON, des restaurants proposent de la chair de baleine de plusieurs espèces pêchées dans le monde entier. Pourtant, seule la pêche des petits rorquals est autorisée, et seulement à des fins scientifiques.



La nécessaire réduction de l'effort de pêche ne se fera pas nécessairement au détriment des emplois. Les gouvernements pourraient augmenter le nombre d'emplois et réduire la pression exercée sur les poissons en ne subventionnant plus les bateaux très mécanisés : pour cinq millions de francs d'investissements, la pêche industrielle emploie une à cinq personnes, tandis que la pêche artisanale en emploierait entre 60 et 3 000. La pêche industrielle menace des dizaines de milliers d'artisans pêcheurs, parce qu'elle épuise toutes les ressources.

Dans certaines pêcheries, on a délibérément limité les performances des bateaux pour éviter les captures excessives et préserver les ressources. Par exemple, dans la baie de Chesapeake, la loi exige que les dragueurs utilisés pour la pêche aux huîtres soient des bateaux à voiles, une restriction qui a permis à cette pêche de survivre. En Nouvelle-Angleterre, l'utilisation de filets tirés par deux bateaux a été interdite, car cette méthode de pêche à la morue était trop efficace.

Dans les pêcheries américaines de thon rouge, les gestionnaires réservent 52 pour cent des captures aux bateaux qui pêchent à la ligne ou à la canne, tandis que les senners pourraient facilement atteindre la totalité du quota car les ligneurs fournissent environ 80 pour cent des emplois directs et les grands senners 2 pour cent seulement. D'autres réglementations concernant la taille des bateaux, les quotas, les subventions et les équipements autorisés traduisent une prise de conscience : on doit diminuer les capacités de pêche pour accroître les bénéfices sociaux et écologiques.

petits dauphins sont souvent piégés dans des filets. En raison de la raréfaction de leurs stocks, divers mammifères marins – le dauphin de Chine, le marsouin de Californie (le plus petit des dauphins), les dauphins d'Hector en Nouvelle-Zélande et le phoque-moine de Méditerranée – sont menacés de disparition. Des oiseaux marins sont également tués lorsqu'ils attrapent les appâts fixés sur les lignes de pêche au moment où celles-ci sont lancées. Dans l'hémisphère sud, plus de 40 000 albatros se font prendre, chaque année, par des hameçons : ils se jettent sur les calmars utilisés comme appâts sur les palangres (des lignes) flottantes destinées à la pêche au thon rouge. Six des 14 espèces de ces majestueux oiseaux errants sont ainsi menacés.

Au cours de certaines campagnes de pêche, les prises accessoires sont plus importantes que les poissons recherchés. En 1992, dans le golfe du Mexique, les pêcheurs ont rejeté 16 millions de crabes royaux pour n'en garder que trois millions. Les charutages de crevettes produisent plus de pertes que n'importe quel autre type de pêche : les quantités rejetées représentent entre une et huit fois celles des crevettes. Dans le golfe du Mexique, les pêcheurs de

crevettes rejettent chaque année 12 millions de poissons de vivaneau et 2 800 tonnes de requins. Sur le plan mondial, les pêcheurs jettent chaque année 12 millions de requins par an, la moitié des requins capturés. De surcroît, comme la plupart des poissons rejetés ne sont pas congelés, on sous-estime vraisemblablement l'ampleur du gaspillage.

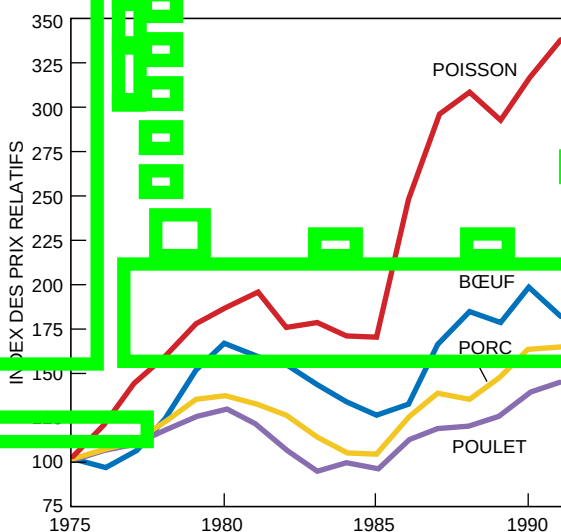
En conséquence, il reste quelques lueurs d'espoir. La capture de tortues marines dans les chaluts à crevettes a des conséquences dramatiques pour

cette espèce dans les eaux des États-Unis (55 000 tortues adultes auraient ainsi été tuées, chaque année), mais, jusqu'à présent, ces pertes diminuent car les chaluts doivent comporter un dispositif qui dirige les tortues vers une fenêtre de chappement.

L'exemple le plus encourageant est sans doute celui des dauphins : 400 000 d'entre eux étaient pêchés accidentellement chaque année dans les pêcheries de thon du Pacifique. Au cours des 30 dernières années, depuis que les pêcheurs de thons ont commencé à utiliser des sennes

à long bec, celle du dauphin à long bec a diminué de 80 pour cent, et celle du dauphin tacheté d'environ 50 pour cent. Pour éviter ce carnage, les pêcheurs ne mouillent plus leurs sennes à proximité des bancs de dauphins, mais autour de troncs d'arbres dérivants ou d'autres épaves flottantes.

Cette méthode, mise en œuvre en 1990, a été très efficace puisque 4 000 dauphins «seulement» ont été tués en 1993. En revanche, les nouvelles techniques de pêche n'épargnent pas les jeunes thons, les espadons, les tortues ni les requins : pour 1 000 coups de sennes à proximité de bancs de dauphins, les



7. L'AQUACULTURE produit de plus en plus de poissons, tandis que les pêcheries marines (qui fournissent encore l'essentiel de la production globale) ont atteint leur maximum en 1989. Depuis, la production mondiale stagne ou diminue.

Menaces sur les merveilles marines

Les habitats marins sont menacés. Dans de nombreuses régions tempérées, les animaux benthiques (qui vivent sur le fond) les plus gros et les plantes dont ils se nourrissent et où ils s'abritent sont détruits par les chalutiers dont les engins ratissent les fonds côtiers.

Dans la région indo-pacifique tropicale, on attrape souvent le poisson en les paralyisant avec du cyanure, mais ce poison détruit également le corail, où nichent les poissons. Certains pêcheurs attirent, en outre, leurs proies dans les filets en broyant du corail avec des pierres ; un bateau peut ainsi détruire près de un kilomètre carré de fond par jour.

Les habitats marins pâtissent également de l'aquaculture, de l'agriculture et de la déforestation. Dans le Pacifique, au Nord-Ouest des États-Unis et du Canada, la déforestation intensive, les barrages hydroélectriques et les détournements de cours d'eau ont détruit des milliers de kilomètres d'habitat de saumons. La plupart des espèces d'esturgeons sont menacées de la même façon dans tout

l'hémisphère Nord. L'abondante sédimentation qui suit une déforestation dégrade également les habitats dans les régions tropicales, car les sédiments comblent les récifs coralliens, empêchant la lumière du soleil de pénétrer et les coraux de se fixer.

En 1981, une toute petite île du Palau, dans le Pacifique, a été classée parmi les merveilles sous-marines pour ses récifs coralliens spectaculaires et quasi intacts. Pourtant, en 1995, j'ai constaté que des coulées de sédiment rouge se déversaient, après chaque grande pluie, dans les lagons coralliens : le sédiment résultait du lessivage

par la pluie de routes mal construites. Au contraire, l'eau d'écoulement qui provenait de la jungle était aussi claire que la pluie elle-même. Près du port de la capitale, des effluents non traités étaient rejetés à la mer, vers les récifs. Riches en éléments nutritifs, ces effluents favorisent la prolifération des algues, qui tuent les coraux en modifiant l'équilibre fragile entretenu avec leurs algues symbiotiques.

pêcheurs attrapent accidentellement 500 dauphins, 52 espadons, 10 tortues de mer et aucun requin. En revanche, pour un même nombre de coups de senne autour d'épaves flottantes, la prise accessoire n'est plus que de deux dauphins, mais on dénombre 654 espadons, 102 tortues de mer et 13 958 requins, et la proportion de thons juvéniles est généralement supérieure.

Afin d'éviter de pêcher ces animaux non recherchés, on pourrait recommencer à pêcher le thon avec des perches et des lignes, comme dans les années 1950. Il faudrait alors recruter des équipages plus importants, comme ceux qui embarquent avant l'ère de la pêche mécanisée. La réduction récente des prises involontaires de dauphins et de tortues nous rappelle que, même si la situation de la pêche mondiale est précaire, il est quelques raisons d'être optimiste. L'analyse scientifique de la gestion des pêches nous permet désormais de privilégier. L'une des mesures qui pourraient limiter la surpêche consisterait à supprimer les subventions accordées aux flottes de pêche qui ne sont pas rentables dans les conditions actuelles de production des océans, mais qui contribuent à l'épuisement des ressources marines.

Partout où les stocks de poissons ont été protégés, ils se sont rétablis et

les activités sociales et économiques liées ont redémarré. Le bar, qui est réapparu le long de la côte Est des États-Unis, est probablement le meilleur exemple d'une espèce dont les stocks se sont reconstitués grâce à une gestion rigoureuse et à une réhabilitation bien menée.

En 1994, l'Organisation des Nations unies a accepté de nouveaux accords de conservation des espèces marines pêchées en haute mer. Ces mesures, renforcées par des accords régionaux de protection de l'environnement marin, aideront l'homme à conserver des océans sains et pleins de vie.

Carl S. FINE appartient au Réseau de préservation des espèces marines et dirige le programme Océans de la Société américaine Audubon.

Global Marine Biological Diversity : A Strategy for Building Conservation into Decision Making, sous la direction de E. Norse, Island Press, 1993.

Understanding Marine Biodiversity, Report of the National Research Council's Committee on Biological Diversity in Marine Systems, National Academy Press, 1995.

Patrick GEISTDOERFER, *La vie dans les abysses*, Pour la Science, collection Sciences d'avenir, 1995.

Le système immunitaire du cerveau

WOLFGANG STREIT • CAROL K. KRICHEVSKY • CAROL K. KRICHEVSKY

Il est formé de cellules microgliales. Normalement protectrices, ces cellules peuvent détruire le tissu cérébral et contribuer au développement de certaines maladies neurodégénératives et à la démence associée au SIDA.

Le tissu cérébral et la moelle épinière sains ne contiennent généralement pas de globules blancs, les sentinelles du système immunitaire. Bien que les globules blancs défendent l'organisme contre les infections et certaines substances capables de tuer nos irremplaçables cellules nerveuses, les neurones. L'organisme minimise cette destruction en empêchant les cellules immunitaires de quitter les vaisseaux sanguins qui irriguent le cerveau et de pénétrer dans ce dernier ; seuls les traumatismes ou les maladies provoquent une telle migration.

Le système nerveux est-il dépourvu de protection immunitaire ? Non : on a récemment découvert que des cellules microgliales font partie de la défense du tissu nerveux. Généralement, ces cellules agissent sans endommager les neurones, mais elles semblent parfois perdre leur caractère bénin : elles provoquent ou potentialiseraient diverses pathologies, tels les accidents vasculaires cérébraux, la maladie d'Alzheimer, la sclérose en plaques et d'autres maladies neurodégénératives.

Les cellules microgliales appartiennent à la lignée des cellules hématopoïétiques, identifiée au début du XIX^e siècle. Les biologistes pensèrent d'abord que la glie n'était qu'une sorte de mastic entre les neurones du cerveau et entre ceux de la moelle épinière. Puis dans les années 1920, les biologistes réussirent à différencier, au microscope, trois types de cellules gliales : les astrocytes, les oligodendrocytes et les cellules microgliales.

Cette idée était née des recherches réalisées au début du XX^e siècle par Pio del Río-Hortega, un élève du neuro-anatomiste espagnol Santiago Ramón y Cajal. En 1919, del Río-Hortega mit au point une technique de coloration, à base de carbonate d'argent, par laquelle il distinguait, sur de minces coupes de cerveau de mammifères, les cellules

microgliales des autres types cellulaires (les neurones, les astrocytes et les oligodendrocytes). Ensuite, pendant plus de dix ans, il chercha à comprendre la fonctionnement de ces cellules étranges.

Il montra que les cellules microgliales ressemblent à des corps amorphes dans le cerveau en développement, puis qu'elles se différencient en cellules ramifiées qui se trouvent dans la région du cerveau et sont en contact avec les neurones et avec les astrocytes (il n'y a pas de contact entre cellules microgliales). Il constata également que les cellules microgliales se réagissent lorsque le cerveau est gravement lésé : lors d'une blessure profonde, les ramifications se rétractent, et les cellules microgliales reprennent leur forme ronde, immature.

Dans cet état, les cellules microgliales ressemblent à des macrophages, des globules blancs présents en dehors du système nerveux central. Or del Río-Hortega a constaté que les cellules microgliales détectent une lésion ou une infection, s'engagent vers les tissus endommagés, promènent et phagocytent les cellules lésées, c'est-à-dire qu'ils collectent les déchets, ingèrent et dégradent les microbes, les cellules mortes et divers débris. Selon lui, les changements de morphologie des cellules microgliales matures correspondent

microgliales des autres types cellulaires (les neurones, les astrocytes et les oligodendrocytes). Ensuite, pendant plus de dix ans, il chercha à comprendre la fonctionnement de ces cellules étranges.

Il montra que les cellules microgliales ressemblent à des corps amorphes dans le cerveau en développement, puis qu'elles se différencient en cellules ramifiées qui se trouvent dans la région du cerveau et sont en contact avec les neurones et avec les astrocytes (il n'y a pas de contact entre cellules microgliales). Il constata également que les cellules microgliales se réagissent lorsque le cerveau est gravement lésé : lors d'une blessure profonde, les ramifications se rétractent, et les cellules microgliales reprennent leur forme ronde, immature.

Dans cet état, les cellules microgliales ressemblent à des macrophages, des globules blancs présents en dehors du système nerveux central. Or del Río-Hortega a constaté que les cellules microgliales détectent une lésion ou une infection, s'engagent vers les tissus endommagés, promènent et phagocytent les cellules lésées, c'est-à-dire qu'ils collectent les déchets, ingèrent et dégradent les microbes, les cellules mortes et divers débris. Selon lui, les changements de morphologie des cellules microgliales matures correspondent

CELLULE
MICROGLIALE

AXONE

1. LES CELLULES MICROGLIALES (*en rouge*) au repos sont en contact avec les cellules qui les entourent ; elles les surveillent, prêtes à réagir rapidement en cas de lésion ou de maladie. Dans le système nerveux central, les cellules microgliales sont aussi nommées cellules de la neuroglie ; elles sont plus nombreuses que les neurones et sont uniformément réparties entre ces derniers.

à une métamorphose macrophagique. En 1932, il postula que les cellules microgliales sont les macrophages du système nerveux central.

Les macrophages du cerveau

Bien que les hypothèses de del Río-Hortega fusent plausibles, peu de neurobiologistes le suivirent durant les 50 années qui suivirent, surtout parce que sa méthode de coloration n'était pas fiable. Sans technique pour différencier les cellules microgliales des autres types de cellules, personne ne pouvait étudier leur fonction. Les études n'ont repris que dans les années 1980, lorsque Hugh Perry et ses collègues de l'Université de Cambridge ont développé des anticorps monoclonaux capables de se lier aux cellules microgliales. Chaque anticorps monoclonal se lie à un seul type de protéine, son antigène spécifique. Si l'on montrait que de tels anticorps reconnaissent leur cible uniquement sur les cellules microgliales – et non sur d'autres cellules du système nerveux central –, on disposerait là d'une nouvelle

« méthode de coloration » : en liant ces anticorps à un marqueur repérable, par exemple à un composé fluorescent, on pourrait différencier les cellules microgliales des autres cellules.

En 1981, l'équipe de H. Perry a démontré que divers anticorps monoclonaux permettent effectivement de localiser les cellules microgliales dans le tissu nerveux. Simultanément, la panoplie des anticorps s'élargit, et des méthodes de culture des cellules microgliales pures apparurent, de sorte que l'on commença à analyser en détail l'activité de ces cellules.

En utilisant les anticorps, on mit en évidence le rôle immunitaire des cellules microgliales dans le cerveau et dans la moelle épinière. Les anticorps reconnaissent des protéines spécifiques des cellules immunitaires retrouvant leur cible sur les cellules microgliales. D'autres anticorps ont révélé que ces cellules ont diverses propriétés des macrophages.

Les macrophages et certaines cellules apparentées sont des cellules présentatrices d'antigènes, qui découpent

les protéines fabriquées par les microbes envahisseurs et qui présentent les fragments sur les molécules à leur surface, en les associant à des molécules nommées antigènes du complexe majeur d'histocompatibilité de classe II. Cette présentation alerte diverses cellules du système immunitaire et déclenche une attaque puissante contre l'envahisseur dont les fragments sont présentés. Entre 1985 et 1989, plusieurs équipes ont montré que les anticorps monoclonaux se liant à des antigènes du complexe majeur d'histocompatibilité de classe II reconnaissent aussi les cellules microgliales. Ainsi, contrairement à ce que l'on pensait auparavant, les cellules microgliales produisent des antigènes du complexe majeur d'histocompatibilité de classe II. Plus fréquent, elles sont vraisemblablement, elles aussi, des cellules présentatrices d'antigènes.

Simultanément, Georg Kreutzberg et ses collègues de l'Institut Max Planck de psychiatrie de Martinsried étudiaient, chez le rongeur, la capacité des cellules microgliales de se comporter comme des macrophages en présence de neu-

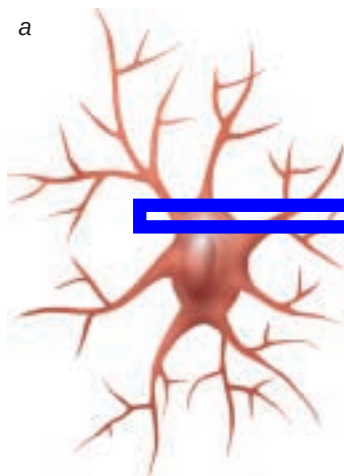
rones gravement endommagés. Certains neurobiologistes avaient prétendu que les cellules microgliales n'appartenaient pas au système immunitaire du cerveau, qu'elles n'étaient que des monocytes envahissant le cerveau ou la moelle épinière lorsque des vaisseaux sanguins du tissu nerveux étaient lésés. Cette affirmation a été difficile à réfuter parce que les anticorps et les colorants qui reconnaissent les cellules microgliales reconnaissent aussi les macrophages dérivés des monocytes sanguins.

G. Kreutzberg et ses collègues trouvèrent une méthode simple pour savoir si les cellules microgliales ayant un aspect ramifié étaient ou non des monocytes du sang. Dans leur modèle expérimental ils ont sélectionné des neurones dont le corps cellulaire est dans le cerveau, mais dont les axones se terminent dans les muscles. Ils ont injecté une toxine dans les terminaisons axonales et ont laissé le poison diffuser dans les neurones et les détruire sans endommager les

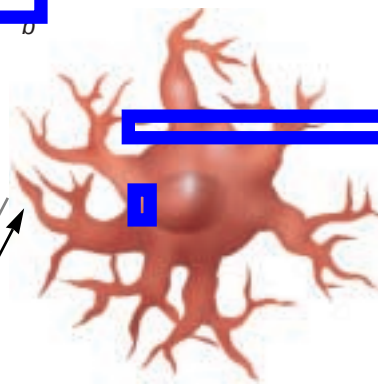
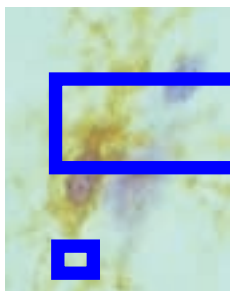
vaisseaux sanguins. Ainsi tout macrophage réagissant à la lésion serait originaire du tissu nerveux et non du sang. Ils ont constaté que les cellules microgliales contenant les restes des neurones endommagés et confirmé que les cellules microgliales migrent effectivement vers les neurones détruits, prolifèrent et éliminent ces neurones. Autrement dit, les cellules microgliales sont effectivement les macrophages spécifiques du cerveau ; elles ne proviennent pas du sang.

Les avatars des cellules microgliales

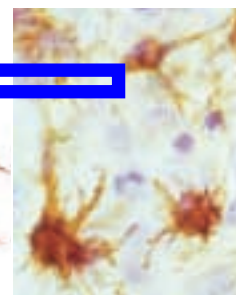
Les cellules microgliales (on peut dire « les microphotographies ») sont ramifiées quand elles sont au repos (a). Dès qu'elles détectent une anomalie, les ramifications se rétractent, elles migrent vers le site menacé et elles changent de forme. Quand elles ont assez de place, elles buissonnent (b). Quand elles doivent s'insérer entre les longs prolongements neuronaux, elles s'allongent (c). Parfois encore, elles adaptent leur forme à celle des neurones lésés (d).



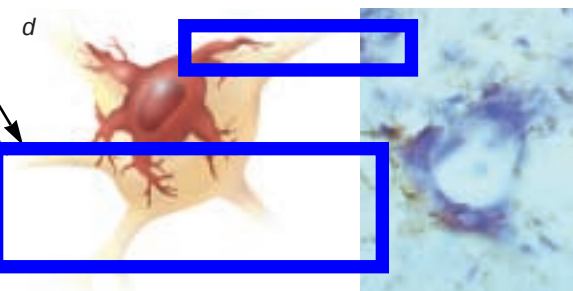
CELLULE MICROGLIALE RAMIFIÉE



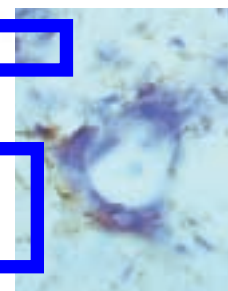
CELLULE MICROGLIALE BUISSONNANTE



CELLULE MICROGLIALE EN FORME DE BÂTON



CELLULE MICROGLIALE EN FORME DE NEURONE



Stade 1 : Repos

La cellule microgliale ramifiée surveille constamment les cellules avoisinantes.

Stade 2 : Activation

La cellule microgliale se déforme dès qu'elle détecte une perturbation de son environnement, par exemple une lésion neuronale.

D'autres expériences réalisées sur des cultures de cellules microgliales pures ont convaincu les derniers sceptiques qu'elles sont bien les cellules qui représentent bien la défense immunitaire du système nerveux, comme le soupçonnait del Río-Hortega. Ces cellules sont très mobiles, ce qui leur permet de se déplacer facilement dans le tissu nerveux jusqu'aux régions lésées. Enfin, lorsqu'elles sont stimulées, les cellules microgliales produisent les mêmes molécules que les

macrophages dans d'autres tissus. Si ces études ont confirmé les convictions de del Río-Hortega, elles nous ont aussi permis de comprendre le fonctionnement des cellules microgliales dans le système nerveux central, sain ou pathologique.

Des caméléons cellulaires

Ces cellules sont indispensables au bon développement de l'embryon. Elles semblent sécréter des facteurs de croissance indispensables au système nerveux central et assurent une fonction de nettoyage indispensable. En effet, le fœtus fabrique beaucoup plus de neurones et de cellules gliales qu'il en a besoin ; les cellules inutiles, qui meurent, sont éliminées par les cellules microgliales immatures, qui n'ont pas encore leur forme ramifiée.

Lorsque le système nerveux central est achevé, les cellules microgliales, qui n'ont plus à dégrader de cellules excédentaires, se mettent au repos et adoptent leur forme ramifiée. Cette conformation leur permet de contrôler l'état de nombreuses cellules avoisinantes.

En repos, les cellules microgliales au repos, mais elles semblent libérer de faibles quantités de facteurs de croissance qui participeraient à la survie des neurones matures et de la glie : le facteur de croissance des fibroblastes et le facteur de croissance des nerfs (ces deux protéines sont sécrétées par les cellules microgliales en culture).

Les cellules microgliales au repos réagissent en quelques minutes aux perturbations de leur environnement, se préparant à entourer les neurones ou autres cellules endommagés. Cette activation se manifeste par une rétraction des ramifications, diverses déformations, la production de protéines absentes chez les cellules au repos, l'augmentation de la synthèse de protéines normalement peu abondantes. Ainsi, l'expression des gènes du complexe majeur d'histocompatibilité augmente notablement.

Si les cellules libèrent plus de facteurs de croissance qu'au repos, mais, si tel est le cas, ce serait pour réparer les neurones endommagés.

La conformation des cellules microgliales activées semble dépendre de l'architecture de leur environnement cellulaire. Si elles sont entourées d'axones, les cellules s'allongent et s'éti-

lent pour s'insérer entre ces filaments. Quand elles en ont la place, comme c'est souvent le cas dans le cerveau, les cellules se ramifient.

Les cellules activées n'acquièrent pas nécessairement la capacité de phagocytose d'autres cellules : quand la lésion détectée est légère ou réversible, elles retournent à l'état de repos. Au contraire, quand la lésion est grave et détruit les neurones, les cellules microgliales agissent comme des macrophages. On ignore encore ce que deviennent les cellules phagocytées, mais, d'après les recherches faites sur des cultures de cellules microgliales et sur des cerveaux malades, ces cellules semblent parfois endommager les neurones qu'elles auraient dû protéger.

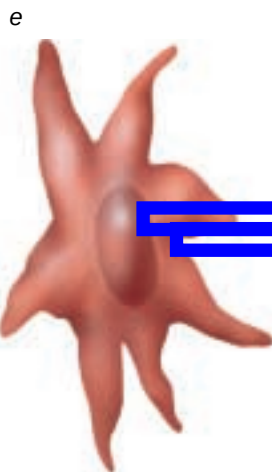
On soupçonne que les cellules microgliales participent à diverses maladies neurologiques depuis que l'on a découvert qu'elles peuvent libérer les mêmes substances que celles que produisent les macrophages en dehors du système nerveux central. Certaines sont dangereuses pour les cellules et, fabriquées en excès, elles pourraient détruire les neurones.

Par exemple, nous avons découvert que les cellules microgliales activées et exposées à certains composés bactériens produisent, comme les macrophages, des radicaux oxygénés réactifs : l'anion superoxyde, le radical hydroxyle (l'un des plus toxiques pour l'organisme) et le peroxyde d'hydrogène. Ces radicaux détruisent les microbes, mais ils risquent aussi d'endommager les membranes, les protéines et l'ADN des neurones ou d'autres cellules.

Les cellules microgliales suractivées produisent également d'autres composés destructeurs, telles des protéases, les enzymes qui découpent les protéines et percent des trous dans les membranes cellulaires, et des cytokines, les molécules qui entretiennent les phénomènes inflammatoires. Ces cytokines, notamment l'interleukine-1 et le facteur nécrosant des tumeurs, attirent divers composants du système immunitaire.

Ces phénomènes inflammatoires favorisent l'élimination des micro-organismes infectieux et des cellules cancéreuses, mais risquent aussi d'endommager des cellules saines. Dans certaines circonstances, les cytokines peuvent léser les neurones, et le facteur nécrosant des tumeurs peut détruire les oligodendrocytes.

Quand les lésions sont réparées, les cellules microgliales peuvent reprendre leur forme de repos (*les flèches grises*). Au contraire, quand les neurones sont détruits, les cellules microgliales évoluent vers un état encore plus actif, où elles engloutissent les cellules mortes (*e*), comme les macrophages.



CELLULE MICROGLIALE PHAGOCYTAIRE



Stade 3: Stade phagocytaire

À ce stade, la cellule réagit à la mort d'autres cellules et tente de dégrader la matière morte.

Toutefois ces effets ont seulement été observés *in vitro*, et rien ne prouve que les cellules microgliales libèrent les mêmes substances *in vivo* : le système nerveux central semble surveiller étroitement les cellules microgliales, minimisant la quantité de substances libérées lors des blessures ou des maladies ; sinon, personne ne survivrait. Toutefois, d'après les observations faites sur diverses maladies neurologiques, cette surveillance serait relâchée chez certains patients, soit parce que les cellules microgliales sont anormales, soit parce que la régulation normalement exercée sur ces cellules est perturbée.

Un potentiel destructeur

Une activité microgliale excessive participe à la démence associée au SIDA : le virus de l'immunodéficience humaine, responsable de la maladie, n'attaque pas les neurones, mais infecte les cellules microgliales. Dès qu'elles sont envahies, ces cellules produisent

des quantités notables de cytokines inflammatoires et de diverses molécules toxiques pour les neurones.

La perturbation de la régulation des cellules microgliales interviendrait aussi dans la maladie d'Alzheimer. Le cerme des patients atteints de cette maladie est envahi de plaques séniles, des lésions anormales où des fragments de la protéine bêta-amyloïde se mêlent à des cellules microgliales, à des astrocytes et à des terminaisons des neurones lésés. Ces plaques semblent contribuer à la mort neuronale, responsable de la détérioration des facultés mentales. On ignore encore comment elles

mais, pour beaucoup, la protéine bêta-amyloïde agit en cause, nous pensons qu'elle agit en détériorant les cellules microgliales. Nous savons déjà que les concentrations en interleukine-1 et en cytokines produites par les cellules microgliales sont élevées dans les plaques séniles : un signal, peut-être la protéine bêta-amyloïde, active les cel-

lules microgliales localisées dans des plaques, leur faisant libérer des radicaux oxygénés et des enzymes protéolytiques qui endommagent les neurones.

Les cellules microgliales pourraient même participer à la formation des plaques : lorsque le système nerveux central est lésé, elles produisent le précurseur de la protéine amyloïde, une protéine qui, une fois dégradée, forme la protéine bêta-amyloïde. On a montré sur des cultures cellulaires que l'interleukine-1 déclenche la production de la protéine précurseur de la protéine amyloïde par diverses autres cellules, peut-être par les neurones eux-mêmes. Enfin, les radicaux oxygénés fabriqués par les cellules microgliales activées favorisent l'agrégation des fragments de protéine bêta-amyloïde.

Dès que les cellules microgliales sont actives, un cercle vicieux risque de s'installer : si elles produisent le précurseur de la protéine bêta-amyloïde, leurs protéases pourraient découper cette molécule et produire la protéine bêta-amyloïde ; simultanément, l'interleukine-1 déclencherait la production de la protéine bêta-amyloïde par d'autres cellules. Les radicaux oxygénés provoqueraient l'agglutination des protéines bêta-amyloïde libérées par toutes ces cellules, ce qui activerait de nouvelles cellules microgliales, augmenterait la production de la protéine bêta-amyloïde, favoriserait la formation des plaques, et ainsi de suite.

Le cerveau des individus atteints de trisomie 21 contient également beaucoup de plaques séniles, mais ces dernières apparaissent plus tôt que chez les patients atteints de la maladie d'Alzheimer. Comme les anomalies du cerme se ressemblent dans ces deux maladies, nous avons cherché à savoir si les cellules microgliales sont responsables des lésions du tissu cérébral chez les individus trisomiques. En étudiant des fœtus de souris qui ont une anomalie génétique analogue à la trisomie 21 humaine, nous avons montré que leurs cellules microgliales sont plus actives et plus abondantes

que celles des fœtus normaux. De plus, elles libèrent des quantités supérieures de radicaux oxygénés, d'interleukine-1 et d'autres cytokines qui peuvent endommager le tissu nerveux.

Les victimes d'accidents vasculaires cérébraux, également, semblent perdre des neurones à cause de cellules microgliales trop actives : lorsque la circulation sanguine est interrompue dans

L'origine controversée des cellules microgliales



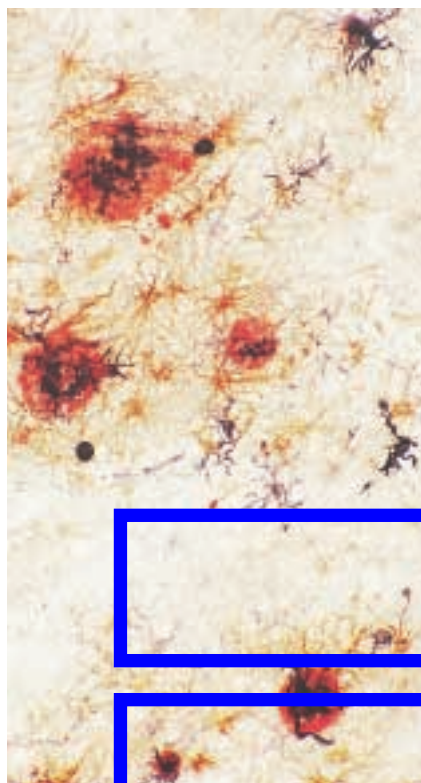
Pio del Río-Hortega

En 1932, Pio del Río-Hortega, le pionnier de la recherche sur les cellules microgliales, déclencha une controverse qui dura plus de 50 ans. Dans l'article où il supposait que les cellules microgliales sont le système de défense et de voirie du système nerveux central, il prétendit que ces cellules n'avaient pas la même origine embryonnaire – l'ectoderme – que les neurones. Selon lui, les cellules microgliales provenaient plutôt du mésoderme, la couche de cellules embryonnaires qui forme la

moelle osseuse, le sang, les vaisseaux sanguins et les organes lymphatiques. Toutefois, il ne précisait pas de quelle lignée mésodermique il s'agissait : les cellules microgliales étaient-elles issues des globules blancs nommés monocytes, quittant la circulation sanguine du fœtus pour pénétrer dans le cerveau et dans la moelle épi-

nière ? Ou bien descendaient-elles de cellules « cousines » des monocytes, qui migraient dans le système nerveux central sans passer par le sang.

Pendant quelque temps, on a privilégié l'origine monocyttaire ; les biologistes pensaient que les précurseurs des cellules microgliales étaient des monocytes attirés dans le système nerveux central en développement par les neurones qui meurent au cours de l'élaboration du cerveau et de la moelle épinière. Aujourd'hui, cette hypothèse est controversée, car Jutta Schnitzer, du Centre Max Delbrück de médecine moléculaire, à Berlin, et Ken Ashwell, de l'Université de Sydney, ont montré que la rétine, qui fait partie du système nerveux central, est parsemée de cellules microgliales, très tôt au cours du développement, bien avant que les neurones ne commencent à mourir. Diverses expériences semblent montrer que les cellules microgliales sont plutôt des « cousines » des monocytes.



Les produits libérés par les cellules microgliales : des armes à double tranchant		
Substance chimique	Effets bénéfiques	Effets toxiques
Protéine précurseur de la protéine bêta-amyloïde	Inconnus	Après dégradation, donne la protéine bêta-amyloïde
Cytokines (messagers immunitaires)	Attirent d'autres cellules vers le site d'infection ; certaines favorisent la survie ou la réparation des astrocytes ; d'autres combattent les tumeurs	Risquent d'endommager des cellules saines et de déclencher la sécrétion, par d'autres cellules, de substances toxiques
Facteurs de croissance	Favorisent la survie et la réparation des neurones	Inconnus
Enzymes protéolytiques	Participent à la dégradation des microbes et des cellules endommagées	Peuvent détériorer les membranes des cellules saines ; peuvent contribuer à la formation de la protéine bêta-amyloïde
Radicaux oxygénés	Peuvent endommager les membranes, les protéines et l'ADN des microbes	Peuvent endommager les cellules saines et favoriser l'agrégation des protéines bêta-amyloïde

2. LES PLAQUES SÉNILES (les régions arrondies sur la photographie) semblent provoquer les lésions neuronales responsables des déficits de mémoire chez les patients atteints de la maladie d'Alzheimer et du trisomie 21. Ces plaques contiennent surtout des fragments de la protéine bêta-amyloïde (en rouge orangé), toxique pour les neurones et pour les cellules microgliales (en violet foncé). Les

plaques contiennent aussi d'autres cellules gliales nommées astrocytes (les "étoiles" brunes), ainsi que des axones endommagés et des dendrites (non visibles). Les cellules microgliales favoriseraient la formation de ces plaques. Une fois activées, elles endommageraient directement les neurones en libérant des substances toxiques, dont certaines sont répertoriées sur le tableau.

un gros vaisseau qui alimente le cerveau antérieur, le tissu cérébral irrigué par ce vaisseau dégénère rapidement. Au cours des jours qui suivent, des neurones particulièrement vulnérables localisés dans l'aire CA1 de l'hippocampe dégénèrent également. Or les cellules microgliales sont activées dans les minutes qui suivent l'accident vasculaire, bien avant que les neurones de l'hippocampe ne soient détruits (cette activation est mise en évidence par des modifications de forme et par une réaction chimique). Les cellules microgliales, détectant le danger, tenteraient de protéger les neurones, déclenchant ou augmentant la sécrétion de facteurs de croissance capables de réparer les lésions. En outre, les modifications chimiques qui ont lieu dans la région lésée entraînent des régulations des cellules microgliales, qui deviennent agressives.

Enfin, les cellules microgliales pourraient également participer à l'apparition de la sclérose en plaques, de la maladie de Parkinson et de la sclérose latérale amyotrophique. Les cellules microgliales évoluent aussi avec l'âge, comme en témoigne l'augmen-

tation du nombre des antigènes du complexe majeur d'histocompatibilité qu'elles produisent. L'activation normale et l'inhibition de la progression vers un état suractivé dangereux se relâcheraient progressivement, ce qui favoriserait la destruction neuronale, et contribuerait à la sénilité et au déclin de la mémoire.

Lueur d'espoir

Les cellules microgliales sont au banc des accusés dans bien des maladies du cerveau, mais si elles interviennent effectivement, on pourrait les inhiber spécifiquement, empêchant ainsi les produits qu'elles libèrent. On teste de tels traitements chez des patients atteints de la maladie d'Alzheimer : on étudie sur quelques semaines l'effet d'un médicament à action anti-inflammatoire capable d'inhiber les cellules microgliales activées. Peut-être parviendra-t-on aussi à stimuler la production microgliale de facteurs de croissance protecteurs.

Il y a 10 ans, certains niaient jusqu'à l'existence des cellules microgliales. Il y a cinq ans, la plupart des médecins auraient ri si on leur avait

dit que ces cellules jouent un rôle important dans la maladie d'Alzheimer.

Aujourd'hui, dans d'autres maladies neurodégénératives, le scepticisme s'estompe : de nombreux neurologues sont convaincus que les travaux sur les cellules microgliales déboucheront sur de nouveaux traitements de quelques-unes des maladies les plus dévastatrices qui touchent l'espèce humaine.

Wolfgang STREIT est professeur de neurosciences à l'Institut de recherches sur le cerveau de Floride. Carol KINCARD-COLON est professeur de physiologie et de biophysique à la Faculté de médecine de Georgetown.

W.J. STREIT, M.B. GRAEBER et G.W. KREUTZBERG, *Functional Plasticity of Microglia : A Review*, in *Glia*, vol. 1, n° 5, pp. 301-307, mai 1988.

Microglia, sous la direction de M.B. Graeber, G.W. Kreutzberg et W.J. Streit, in *Glia* (numéro spécial), vol. 7, n° 1, janvier 1993.

Neuroglia, sous la direction de H. Kettenmann et B.R. Ransom, Oxford University Press, 1995.

La crise biologique à la transition Trias-Jurassique

GILLES COHEN

Il y a 220 millions d'années, la faune s'est profondément modifiée. Les grands reptiles du Trias ont cédé la place aux dinosaures, et les lignées modernes, dont les mammifères, se sont mises en place.

Depuis l'apparition de la vie sur Terre, les écosystèmes de notre planète ont été fortement perturbés à plusieurs périodes, où de nombreux lignées animales ou végétales se sont éteintes en peu de temps. La plus connue de ces périodes est la transition Crétacé-Tertiaire, où ont disparu, entre autres, les dinosaures. On dénombre, depuis 410 millions d'années, au moins dix autres crises, où de nombreuses familles animales ont disparu. De telles crises se sont probablement aussi produites au début de l'histoire de la vie. Toutefois, plus on étudie des phénomènes anciens, plus les fossiles sont rares et difficiles à trouver : aussi d'éventuels bouleversements, même de grande ampleur, peuvent-ils passer inaperçus.

Les crises les plus importantes, parmi celles que nous connaissons, sont au nombre de trois. Il y a 365 millions d'années, 63 pour cent des familles de poissons ont disparu. Il y a 252 millions d'années, 88 pour cent des familles de tétrapodes (les animaux à quatre pattes) se sont éteintes. Enfin, entre le Permien et le Trias, il y a 245 millions d'années, 49 pour cent des familles de tétrapodes ont disparu. En comparaison, 14 pour cent seulement des familles de tétrapodes ont disparu à la fin du Crétacé.

Les paléontologues et les géologues essaient de déterminer les causes de ces extinctions en masse. Ils privilégient aujourd'hui les explications de type catastrophe : un événement unique et hors du commun, telle la chute d'une météorite ou une éruption volcanique, serait, par réaction en chaîne, respon-

sable de l'effondrement d'un écosystème et des extinctions qui en résultent. Toutefois la crise qui s'est produite entre le Trias et le Jurassique, où 22 pour cent des familles de tétrapodes se sont éteintes, montre que les choses ne sont pas toujours si simples. Cette crise s'étend sur près de 15 millions d'années, entre la fin du Carnien (il y a 220 millions d'années) et le début de l'Hettanien (il y a 205 millions d'années). Elle est particulièrement importante dans l'histoire de la vie animale : elle marque le début de la domination des dinosaures, qui a duré près de 150 millions d'années. Elle nous intéresse tout particulièrement : la plupart des lignées animales modernes, dont les mammifères, se sont mises en place à cette période.

Quelles ont été les causes de cette crise ? Il est probable que les continents étaient rassemblés et formaient la Pangée (l'océan Atlantique n'existait pas), l'évolution de la faune a été différente en Europe et en Amérique du Nord. En Europe, les plus grands bouleversements seraient intervenus entre le Carnien et le Norien, il y a 220 millions d'années. En Amérique du Nord, la crise aurait culminé à la fin du Trias,

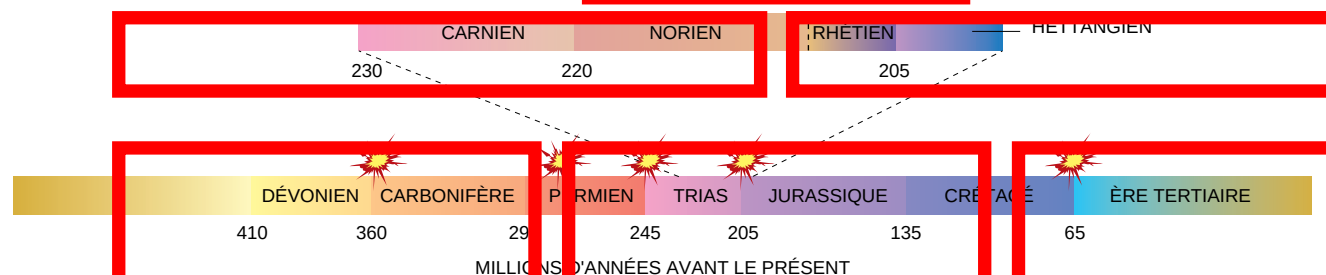
15 millions d'années après la fin du Carnien. Mais le mécanisme global est donc peu vraisemblable. Les paléontologues pensent que des variations climatiques régionales, de nature différenciée, au cours du temps, ont modifié assez vite les milieux naturels : les espèces trop spécialisées vis-à-vis d'un biotope, incapables de survivre dans un environnement différent, auraient alors disparu.

Des dinosaures et des mammifères discrets

Les dinosaures, les ptérosaures (leurs cousins volants) et, dans une moindre mesure, les mammifères ont été les principaux bénéficiaires du bouleversement de la faune à la fin du Trias. Au Carnien, il y a entre 230 et 220 millions d'années, les ptérosaures ne sont pas encore et les dinosaures ne sont représentés que par quelques espèces, dont le rôle au sein des écosystèmes est relativement discret. Les mammifères viennent aussi d'apparaître. On n'en connaît qu'un seul fossile, *Adelobasilus*, dont le crâne dépasse à peine deux centimètres. En revanche, leurs proches cousins, les reptiles mammaliens du

1. PAYSAGES D'EUROPE au Carnien (en haut) et au Norien (en bas). Au Carnien (il y a entre 220 et 225 millions d'années), la faune, reconstituée ici d'après les fossiles découverts à Lossiemouth, en Écosse, est dominée par les «thécodontes». Le carnivore *Ornithosuchus* menace *Stagonolepis*, un végétarien protégé par ses osseuses. Un autre reptile végétarien, le rhynchosaure *Platysuchus*, tient aussi l'arbre. Au Norien (il y a entre 220 et 210 millions d'années), reconstitué d'après des fossiles découverts en Allemagne, en Belgique, en France et en Italie, de nouvelles formes de reptiles se développent. Les dinosaures sont surtout représentés par le prosauropode *Plateosaurus*, situé à l'arrière-plan, mais aussi par de petits dinosaures carnivores tel *Procompsognatus*, au pied de l'arbre. Les airs se peuplent de ptérosaures, ici *Eudimorphodon* et les premières tortues apparaissent avec, au premier plan *Proganochelys*. Les premiers mammifères, tel *Woutersia* tapi au pied de *Proganochelys*, attendront encore 145 millions d'années leur heure de gloire.





2. LA PETRIFIED FOREST FORMATION, en Arizona, a livré une riche faune de vertébrés du Carnien (en haut, à gauche). En France, dans le Jur., on observe des amonèvements datant du Norien (en haut, à droite). Sur l'échelle des temps géologiques (en bas), les étoiles indiquent les plus importantes crises répertoriées dans l'histoire de la vie.

groupe de cynodontes chiniquodontes, sont bien représentés, par des formes en général de petite taille, avec un crâne dont la longueur est comprise entre trois et six centimètres. Ces animaux formaient une communauté d'insectivores importante et diversifiée.

La faune du Carnien est dominée par des amphibiens et des reptiles dont la plupart sont en place depuis au moins le début du Trias, il y a 245 millions d'années. Les grands reptiles herbivores, mesurant de un à trois mètres de long, sont représentés par cinq groupes : les dicynodontes, les traversodontes, les rhynchosaures, les trilophosaures et les aëtosaures. Les quatre premiers groupes ont en commun des pattes situées sur le côté du corps, peu efficaces pour se déplacer, ainsi qu'un système de mastication très évolué, quoique différent d'un groupe à l'autre. La mâchoire supérieure des dicynodontes possède deux défenses

absentes. Les végétaux étaient broyés, avant d'être digérés, par un bec corné qui remplaçait les dents grâce à un mouvement de la mâchoire d'avant en arrière. Les traversodontes possédaient des dents postérieures élargies qui permettaient une mastication efficace. Les rhynchosaures étaient, quant à eux, pourvus d'une mâchoire particulière :

les os de l'avant de la mâchoire étaient recourbés pour former une pince puissante qui permettait à l'animal de couper des plantes dures à ras du sol. Les trilophosaures étaient des quadrupèdes lourdement bâtis, avec des dents postérieures élargies comme celles des traversodontes.

Les dicynodontes et les traversodontes sont des reptiles mammaliens, de la lignée qui a donné naissance aux mammifères, tandis que les rhynchosaures et les trilophosaures sont d'une lignée voisine de celle des «thécodontes» qui ont donné naissance aux crocodiles. Des aëtosaures sont des «thécodontes» et se distinguent par des membres situés sous leur corps. Ils possédaient, sur le ventre et sur le dos, une carapace de plaques osseuses rectangulaires articulées. Leur système de mastication était peu efficace, formé seulement d'une rangée de petites

Les «thécodontes»

Les «thécodontes» sont un ensemble hétérogène de reptiles : de nombreuses controverses persistent quant à leur classification exacte. Le seul point qui fait aujourd'hui l'unanimité est qu'ils se sont divisés en deux lignées principales :

l'une, à laquelle appartiennent les aëtosaures, a donné naissance aux crocodiles ; l'autre a donné naissance aux dinosaures et aux ptérosaures. Les grands carnivores terrestres du Carnien sont représentés par deux ensembles de «thécodontes», les Rauisuchia et les Ornithosuchidae. Les Rauisuchia sont placés sur la lignée qui mène aux crocodiles, tandis que les Ornithosuchidae sont placés sur une ou l'autre des deux lignées. De grande taille, ils dépassaient parfois trois mètres de long et étaient généralement quadrupèdes. Leurs membres, comme ceux des aëtosaures, étaient placés sous leur corps et leur permettaient de se déplacer facilement et vite.

En plus de ces grands animaux, des carnivores de plus petite taille, de moins de un mètre de long, se nourrissaient plus volontiers de petites proies et de carcasses abandonnées. Un exemple significatif est *Erpetosuchus*,

cet animal de 70 centimètres de long était pourvu, sur le devant, de grandes dents recourbées ; à l'arrière, une crête osseuse édentée servait certainement à broyer les proies, des insectes essentiellement. Comme pour la plupart de ces petits «thécodontes», les relations de parenté d'*Erpetosuchus* sont floues.

Les petits reptiles omnivores constituent un ensemble assez diversifié. On y trouve des «thécodontes», tel *Scleromochlus*, qui ne dépassait pas 20 centimètres de long et possédait des membres postérieurs beaucoup plus développés que les membres antérieurs. *Scleromochlus* était très proche de l'ancêtre direct des dinosaures ou des ptérosaures. Les sphénodontes, cousins des lézards et des serpents, dont le seul représentant actuel est le Tuatara de Nouvelle-Zélande, commencent à se diversifier au Carnien : ils représentent une composante non négligeable de faunes de cette époque. Ils partageaient la niche écologique de nos actuels lézards et serpents. Les prosauropodes, de petits animaux, aujourd'hui disparus, dont la taille était comprise entre 10 et 30 centimètres et dont l'aspect général rappelle celui des tortues, possédaient des animaux portaient sur le crâne des protubérances osseuses dont le rôle était vraisemblablement défensif. Leurs dents massives indiqueraient un régime végétarien ou insectivore.

Enfin les faunes amphibiennes des lacs et des rivières sont dominées par deux groupes : les amphibiens temnospondyles et les phytosaures. Les amphi-

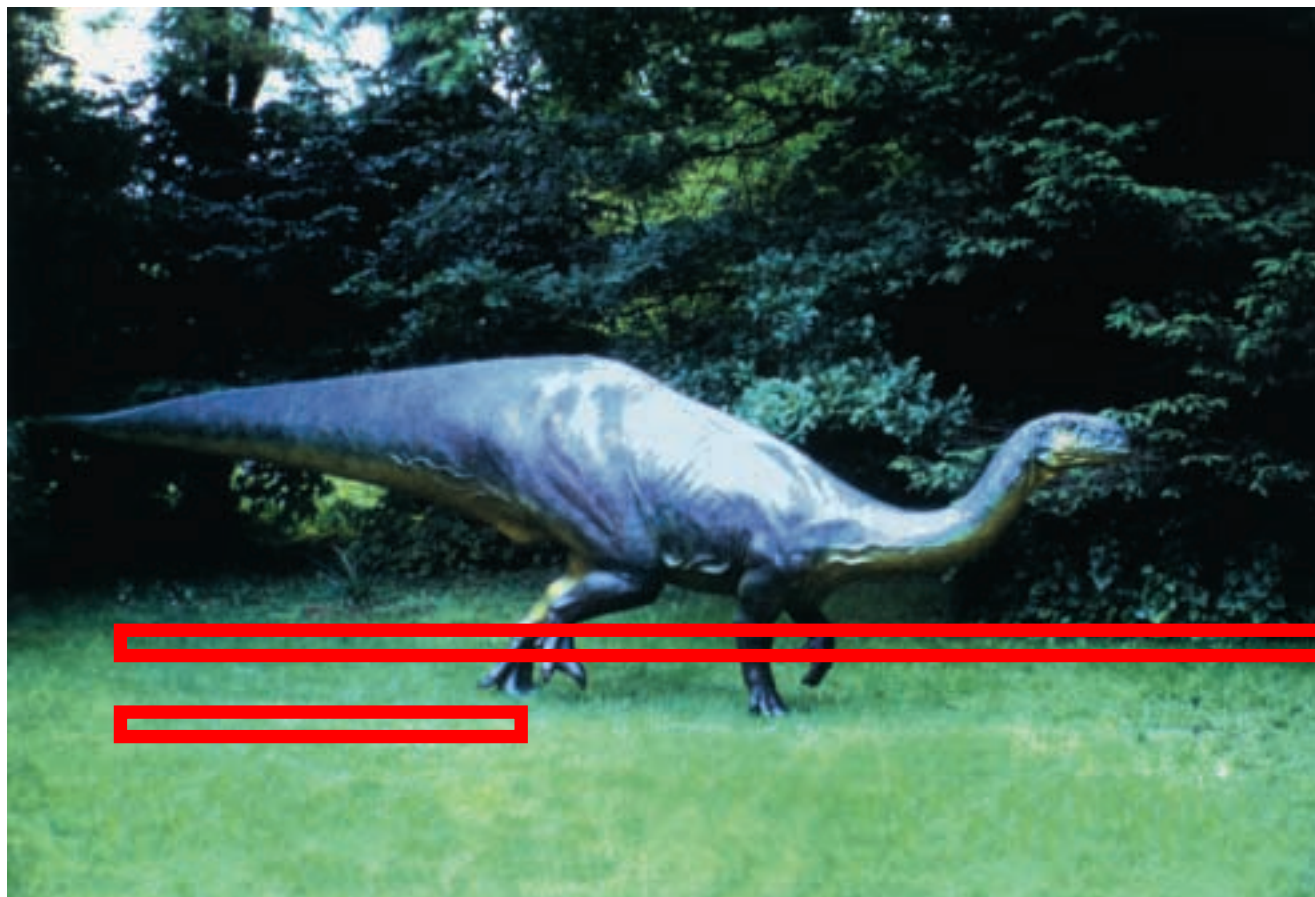
biens temnospondyles étaient représentés essentiellement par des Métoposaures, au crâne plat et fortement ossifié. Leurs pattes peu développées indiquent un mode de vie plus aquatique que terrestre. La plupart de ces prédateurs dépassaient un mètre de long. Les phytosaures sont des reptiles «thécodontes» dont la morphologie générale rappelle celle des crocodiles actuels, bien qu'ils n'aient aucun lien de parenté avec eux. Ils se distinguent par des narines situées au sommet du front et par un museau généralement très allongé et plus fin. En outre, sur la mâchoire supérieure des phytosaures, c'est l'avant qui est développé pour allonger le museau, tandis que chez les crocodiles, c'est le maxillaire. Ces phytosaures atteignaient six mètres de long.

Les modifications du Norien

En extrayant les fossiles des couches sédimentaires, on constate une profonde modification de la faune entre le Carnien et le Norien, qui lui est immédiatement postérieur. Les grands reptiles herbivores, les dicynodontes et les rhy-

nosaures disparaissent, tandis que la diversité des traversodontes et des tritylodontes diminue. Les traversodontes ne sont plus connus que par une petite forme européenne, *Microscalenodon*. Seuls les aétosaures se maintiennent avec, en particulier, le genre *Aetosaurus*, dont plusieurs dizaines de squelettes ont été découverts en Allemagne. En revanche, les dinosaures se développent spectaculairement. De nombreux genres disparaissent, mais d'autres passent à 25, voire 60 pour cent, selon les endroits. Les prosauropodes, qui se répandent, tel le genre *Plateosaurus*, en Europe, qui atteignait huit mètres de long. Les dinosaures ornithischiens s'étaient aussi différenciés dès cette époque, mais ils restent discrets : on n'en retrouve que quelques genres au Norien.

Les nouveaux reptiles mammaliens végétariens du Norien, les tritylodontes, sont différents de leurs prédécesseurs. Leur longueur ne dépassait guère un mètre. Comme celle des traversodontes, leur dentition permettait une mastication efficace, avec des postcanines ressemblant aux molaires des mammifères.



3. CETTE RECONSTITUTION DE *PLATEOSAURUS*, un dinosaure sauropode du Norien, est l'œuvre du sculpteur suisse Pascal Rérat.

Parmi les grands reptiles carnivores on observe la raréfaction des «thécodontes». Un seul *Raeticosuchus* semble encore présent en Europe, *Teratosaurus* : il n'est connu que par un fragment de maxillaire. En revanche, les petits dinosaures théropodes se diversifient. Uniquement en Europe, on note la présence de *Procompsognathodon*, *Therapsaurus* et de *Liliensternus*. Ce dernier pouvait atteindre une longueur de trois mètres. Il faut aussi signaler l'extrême abondance de *Rioarribasaurus* (ou *Coelophysis*) au Nouveau-Mexique : on y a retrouvé plus d'une centaine de squelettes de ce petit dinosaure.

Parmi les petits reptiles de type lézard, les sphénodontes multiplient les genres et les types adaptatifs, avec des formes probablement complètement herbivores et d'autres omnivores. Les proclophoniens se raréfient : peut-être disparaissent-ils avant la fin du Norien.

Les mammifères se diversifient aussi : on connaît en Europe pas moins de trois ordres nouveaux de mammifères, les triconodontes, les multituberculés et les symétrodontes, nommés ainsi d'après la forme de leurs dents. Plusieurs genres ont été dégagés du site de Saint-Nicolas-de-Port, en Lorraine, l'un des gisements les plus riches du monde : il a livré plus d'une centaine de dents de mammifères. La longueur des triconodontes et des symétrodontes, insectivores, ne dépasse guère celle d'une musaraigne actuelle. Les multituberculés, pas plus grands, ont en revanche un régime alimentaire végétarien et des molaires plus aplaties. Ces premiers mammifères se seraient développés grâce à un mode de vie nocturne, ce qui leur aurait évité une compétition directe avec les reptiles. Les reptiles mammaliens du groupe des cynodontes chiniquodontes, avec des tailles identiques à celles des premiers mammifères, sont encore relativement nombreux.

Les faunes amphibiennes changent peu. Les phytosaures sont toujours présents, mais on note une diminution de la variété des amphibiens temnospondyles.

Outre le développement spectaculaire de nouvelles lignées comme les dinosaures et les mammifères, et l'extinction brutale de certains groupes typiques du Trias, le Norien se distingue



4. DENT DE *THOMASIA*, un mammifère primitif, ici photographiée au microscope électronique, retrouvée dans les sédiments du Rhétien dans le Jura.

par la brusque apparition de lignées que l'on peut qualifier de modernes. Apparaissent d'abord les premières tortues avec *Chelonioidea* en Allemagne et en Thaïlande. Cette tortue de près de un mètre de long, encore imparfaite, est incapable de fermer la carapace : son cou et sa queue sont hérissés de pointes osseuses à fonction défensive. On note aussi la présence de deux tortues un peu plus modernes, l'une en Allemagne, *Proterochersis*, et l'autre, non encore décrite, en Argentine.

Les premiers crocodiles

Les premiers crocodiles, nommés sphénosuchiens, apparaissent aussi. Ils ont peu de points communs avec les crocodiles que nous connaissons. Ils ne sont pas amphibies, mais terrestres, légèrement bâtis, hauts sur pattes et rapides. Les sphénosuchiens ont des traits qui nous sont plus familiers qu'au Jurassique. Les sphénosuchiens terrestres seraient entrés en compétition avec les dinosaures, qui auraient pris l'avantage : les crocodiles n'auraient eu d'autre choix que de se réfugier dans une niche écologique amphibie laissée libre par la disparition des phytosaures. Leur succès y fut impressionnant.

La troisième lignée nouvelle qui apparaît au Norien est celle des phytosaures, qui connaît un succès quasi immédiat. Les trois genres actuellement connus en Italie représentent trois familles, différentes par leur alimentation. Selon leurs dents, l'une était piscivore (on a même retrouvé un poisson dans l'estomac d'un fossile), une autre était insectivore, et la troisième avait une alimentation plus variée. On aurait

découvert au moins six genres différents de ptérosaures à travers l'Europe, la moitié n'ayant pas encore été décrite. La taille de ces premiers ptérosaures est modeste : leur envergure ne dépasse pas un mètre. Leur succès est rapide, car il n'y avait à cette époque aucun vertébré réellement volant : la niche écologique qu'ils remplissaient était inoccupée. Quelques reptiles plaquaient comme l'actuel lézard

horaciques, très allongées, portaient une membrane qui leur permettait de voler du sommet d'un arbre jusqu'au sol. Ces animaux, qui atteignaient 70 centimètres d'envergure, étaient parfois incapables d'un quelconque vol battu, au contraire des ptérosaures.

En plus de ces lignées dont l'évolution s'est poursuivie au Jurassique, la diversification des reptiles au Norien donne aussi le jour à des formes éphémères, dont les relations phylogénétiques avec les autres reptiles ne sont pas toujours bien comprises et qui présentent parfois des adaptations surprenantes. *Drepanosaurus*, un petit reptile de 30 centimètres de long que l'on a trouvé en Lombardie, est un bon exemple. À cette époque, la Lombardie était un petit archipel en bordure de l'océan Téthys, et *Drepanosaurus* semble s'être répandu sur un certain nombre d'îles. Il se distingue de tout autre reptile par l'énorme griffe que porte le deuxième doigt de sa main et par la denture à la base de la queue, recourbée à la façon d'une griffe (à moins qu'il ne s'agisse d'une vraie griffe, collée accidentellement au bout de la queue lors de la fossilisation). La griffe hypertrophiée de sa main lui aurait permis de creuser le sol à la recherche d'insectes dont il se nourrissait. La classification de *Drepanosaurus* pose beaucoup de problèmes : est-il sur la branche des lézards et des serpents, ou

des phytosaures ? En tout cas, il n'a pas laissé de descendants.

La faune du Norien présente de nombreux indices d'une crise importante entre le Carnien et le Norien. Des lignées dominantes apparaissent ou se réduisent considérablement, tandis que d'autres se développent. On voit aussi apparaître un ensemble de nou-

velles lignées. Certaines connaîtront un franc succès, tandis que d'autres disparaîtront aussitôt. Tout se passe comme si, après une extinction brutale, un certain nombre de niches écologiques se libèrent et étaient conquises par des lignées déjà existantes, mais peu représentées, ou par des lignées qui viennent

juste d'apparaître. Cette situation favorise aussi le développement de types adaptatifs nouveaux.

Le principal changement entre le Carnien et le Norien se situe parmi les faunes herbivores, avec le développement des dinosaures. Les dinosaures herbivores ont-ils éliminé les rhyngo-

saures et les diémodontes en les éliminant trop fortement? Ces derniers, comme tous les herbivores du Carnien, se nourrissaient au ras du sol, aux systèmes de mastication très évolués, tandis que les dinosaures prosauropodes, avec un cou allongé, se nourrissaient dans les strates moyennes de

L'extinction des dinosaures, une nouvelle affaire Dreyfus?

Dans une revue spécialisée, Peter Ward, spécialiste des nautiliens, a fait un parallèle entre le procès d'O. J. Simpson, qui vient d'être acquitté, et l'affaire de la météorite responsable de l'extinction des dinosaures. Il rappelle l'une des phrases clé prononcée par le procureur : il y aurait toujours un doute sur l'identité de l'assassin. Peter Ward ajoute qu'il en est de même des controverses scientifiques : des doutes persistent toujours. Pourtant, dans le cas du débat sur la disparition des dinosaures, la cause lui paraît entendue : les preuves apportées jusqu'ici lui suffisent pour déclarer coupable l'objet céleste.

Je n'ajoute rien à ce parallèle, qui consiste à traiter sur un même plan une affaire tristement humaine, avec son douloureux contexte social, et cette vaste question scientifique. Passant sur le sous-entendu de son propos, je ferai trois remarques. Dans une enquête policière sur un meurtre, on attache beaucoup d'importance à trois choses : l'examen du cadavre, l'emploi du temps des victimes et des présumés agresseurs, et la nature des armes employées. Dans l'affaire des dinosaures, n'importe quel enquêteur resterait sur sa faim.

Où sont les cadavres de dinosaures qui, à un moment donné, si l'extinction a été brusque, ont jonché le sol? Nulle trace. Mieux, c'est l'absence de fossiles de dinosaures dans les horizons du Crétacé supérieur qui conduit à conclure que les cadavres ont disparu. À Turgot, en passant par les gisements du Nebraska, de Mongolie et d'autres lieux, des hécatombes massives ont laissé des témoignages dans les sédiments. Pour les dinosaures de la fin du Crétacé, pas la moindre accumulation d'ossements et, au total, fort peu de restes. Ceci est vrai aussi pour les animaux marins qui ont disparu à la même époque : pas le moindre lit coquiller où se seraient accumulés des cadavres se sont, en quelque sorte, évaporés.

Passons à la lecture des éphémérides qui nous renseigneraient sur l'emploi du temps des victimes et de leur agresseur présumé, la météorite. Las, les pages en sont collées et l'emploi du temps en usage pour ces périodes reculées est de l'ordre du million d'années. J'avoue la déception du paléontologue au regard des résultats obtenus par les méthodes physiques en ce domaine.

Quant à l'agent exterminateur, il aurait laissé sa carte d'identité sur les lieux du crime : une proportion anormale d'iridium. Ce métal est connu au sommet des géochimistes, mais sa fiche est peu remplie. On y lit qu'on le trouve associé en général au platine, mais son histoire

géochimique est obscure. Parmi ses fréquentations, on trouve les minéraux des chondrites, constitutives de la plupart des météorites. Par un raisonnement pour le moins circulaire, on en a déduit que sa présence en signe l'occurrence, et l'on a conclu que la météorite responsable, qui, sporadiquement, transportent de l'iridium des profondeurs vers la surface du Globe, et le vaporisent dans les fumées éruptives.

En ce qui concerne l'action dévastatrice de la météorite, les imaginations ont été fécondes. On a spéculé, tour à tour, sur les aérosols et les brumes persistantes qui auraient entraîné un hiver pérenne, et sur un incendie généralisé qui aurait embrasé la Terre. Aucune preuve convaincante n'a été apportée à ces deux fables.

Faut-il donc jeter aux orties de l'histoire tous les travaux et toutes les idées nés depuis l'article fondateur de Luis Alvarez, en 1980? Non. D'abord, dans les années 1980, le scénario de la météorite tueuse a donné à réfléchir aux va-t-en-guerre du Pentagone et du Kremlin, qui mesurèrent la portée du pouvoir de leurs fusées nucléaires et renoncèrent à la guerre nucléaire. Ensuite, convaincus que la catastrophe globale, leurs successeurs bipèdes pouvaient tout aussi bien périr à l'issue d'un conflit nucléaire général. La médiatisation de cette affaire a aussi rendu service à quantité de laboratoires qui ont ainsi justifié l'acquisition d'appareillages coûteux qu'ils utilisent maintenant pour résoudre des problèmes apparemment plus techniques, mais aussi passionnants. Les paléontologues, quant à eux, ont sans aucun doute appris à sortir de leur tour d'ivoire pour fréquenter les autres disciplines.

Cette lecture précipitée des feuillets de la Terre pour en tirer des conclusions caricaturales ne peut être rejetée en bloc, mais on doit maintenant en reprendre le fil plus sereinement. Avions-nous bien évalué la complexité des problèmes que posait, comme toutes les autres crises, l'extinction des dinosaures? Avions-nous les moyens de répondre à ces questions? Je ne le crois pas. Nous n'avons pour le moment consulté qu'une infime fraction des archives, difficiles à consulter, mais qui peuvent nous apporter beaucoup.

On a cependant fait un constat essentiel : la crise entre le Crétacé et le Tertiaire est l'occasion d'une vague d'extinctions très sélectives. Que sait-on des processus écologiques qui, à cette échelle de temps, débouchent sur la sélection d'espèces? C'est sur cette base qu'il faut reformuler les questions.

Jean-Louis HARTENBERGER
Institut des sciences de l'évolution,
Université de Montpellier 2

la végétation, jusqu'à quatre mètres de hauteur. Ils possédaient de petites dents, incapables de broyer efficacement les végétaux dont ils se nourrissaient : leur estomac contenait des petits cailloux, nommés gastrolithes, qui écrasaient la nourriture. Ces deux groupes sont écologiquement différents et ils n'étaient

pas concurrents : les dinosaures se sont plutôt développés d'une manière opportuniste après la disparition des dicynodontes et des rhynchosaures, victimes de leur spécialisation et de la modification du milieu.

Un important changement climatique entre le Carnien et le Norien

explique ces changements de faunes. Au Carnien, le climat était chaud et humide ; pendant le Norien, le climat était plus sec, voire semi-désertique. Le climat semi-aride a défavorisé les grands reptiles mammaliens brouteurs, dont le système excréteur, à base d'urée, nécessitait beaucoup d'eau. Le système excréteur des dinosaures aurait été à base d'acide urique, plus économe en eau. Leur capacité à se nourrir dans les strates hautes de la végétation était adaptée à une végétation plus clairsemée qu'au Carnien, et la position de leurs membres, sous leur corps, leur permettait de se déplacer plus facilement pour trouver leur nourriture. Après l'extinction des reptiles mammaliens, défavorisés dans ce milieu semi-désertique, les dinosaures se développent en toute quiétude.

Le développement des dinosaures carnivores serait un contre-coup de ces changements. Les grands herbivores plus mobiles, la situation des grands «thécodontes» carnivores était moins confortable. Leur diversité se serait donc réduite, et ils auraient laissé la place aux dinosaures.

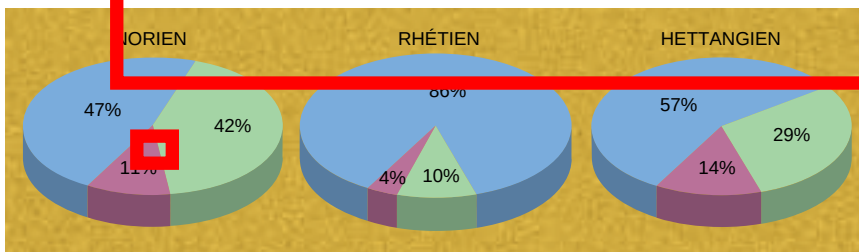
La transgression marine du Rhétien

Après cette extinction de grande ampleur, l'écosystème ne s'est pas stabilisé. En Europe, on observe, un peu avant la fin du Trias, une importante remontée du niveau des mers, la transgression rhétienne. À cette époque, l'Europe est un archipel, pas un continent monobloc. La transgression réduit, sur chaque île, la surface habitable par les reptiles terrestres, et disparaissent notamment les derniers «thécodontes» et les rhynchosaures prosauropodes de la famille des *Plateosauridae*. Les animaux de petite taille, tels que les mammifères et les reptiles sphénodontes, semblent moins souffrir. Leur petite taille est un avantage considérable pour résister à une diminution de surface habitable.

À l'inverse de ce qui se passe sur les terres, les faunes marines sont favorisées par l'extension de la mer sur l'Europe. Les premiers plesiosaures, reptiles marins au cou allongé, apparaissent, et de nouvelles familles d'ichtyosaures, reptiles marins qui ressemblaient aux dauphins, se développent. Les poissons changent aussi beaucoup, avec l'apparition de poissons à dentition broyeuse très évoluée,



5. PIED DE *PLATEOSAURUS* retrouvé tel quel en Haute-Marne, dans une couche sédimentaire du Norien. Les fossiles du Norien retrouvés ainsi, en connexion, sont rares en France.



6. LES VERTÉBRÉS SE SONT RÉPARTIS différemment dans les modes de vie terrestre (en vert), aquatique (en bleu) et amphibie (en rose) au cours de la crise Trias-Jurassique. On voit nettement les conséquences de la transgression rhétienne qui a considérablement réduit le pourcentage des faunes terrestres.

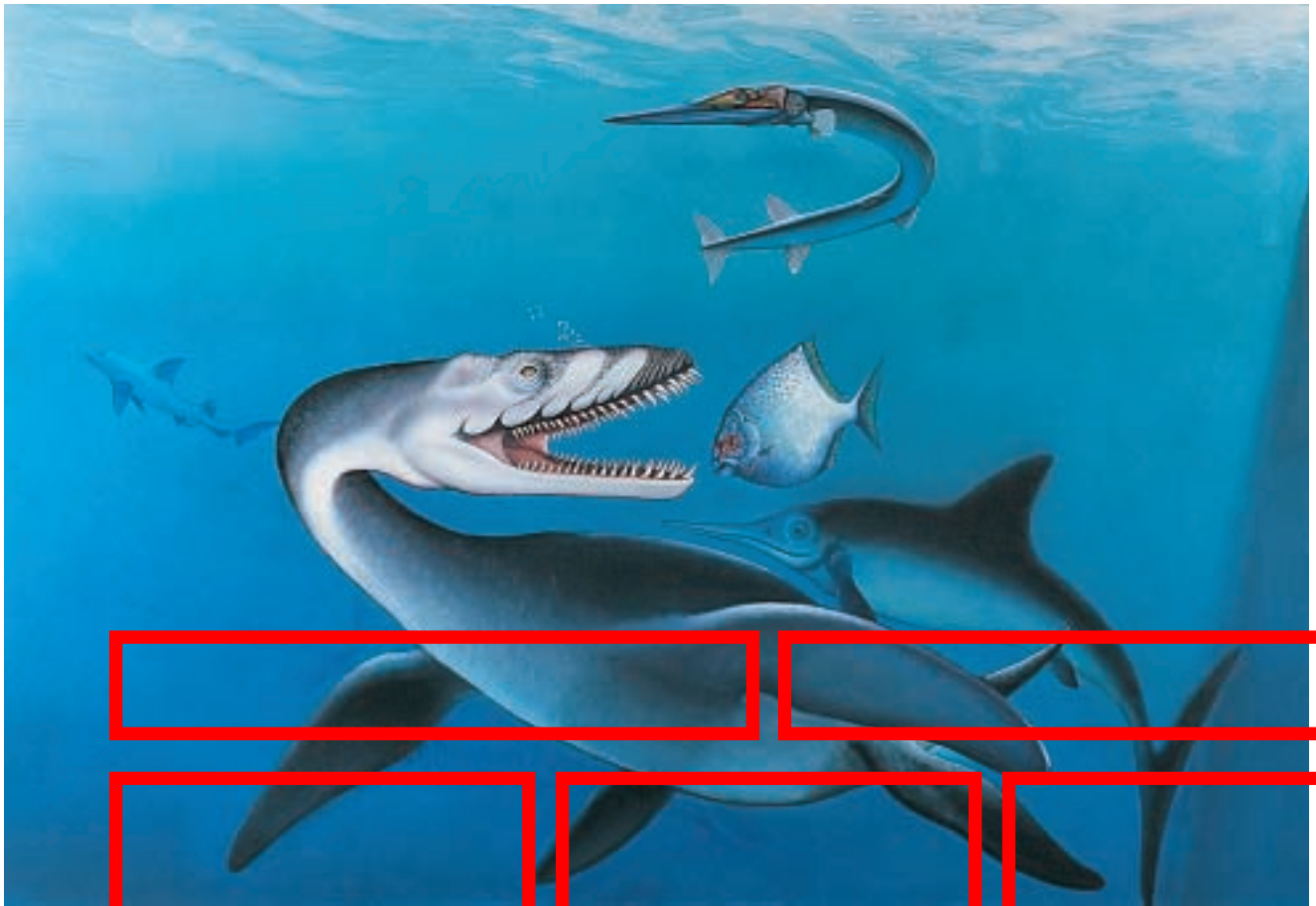
qui se nourrissent d'animaux à coquilles dures. On assiste au développement des premiers poissons téléostéens qui règnent aujourd'hui dans les océans et dans les rivières, ainsi qu'à une explosion de la diversité des requins, avec les premiers requins de type moderne et des formes très spécialisées chez les requins primitifs.

La transgression rhétienne bouleverse un écosystème fragilisé qui sort juste d'une crise importante. Elle ne produit pas une crise catastrophique, mais seulement un réaménagement écologique. Cette transgression rhétienne n'a pas touché toute la planète également. Aux États-Unis, où les couches stratigraphiques n'ont pas enregistré cette montée du niveau des mers, les paléontologues constatent pourtant toute une série d'extinctions, plus brutales qu'en Europe à la même période. Certains contestent l'existence d'une crise à la limite entre le Carnien et le Norien : les extinctions observées seraient purement locales, le grand phénomène d'extinction aurait lieu à la fin du Trias. Cette crise serait courte : en 100 000 ou 200 000 ans, la faune typique du Jurassique serait déjà en place, alors que la transition a duré entre un et quatre millions d'années en Europe.

La météorite en question

La chute d'une météorite est-elle intervenue dans cette crise, comme dans celle de la fin du Crétacé ? Au Québec, à Manicouagan, un cratère d'impact d'un diamètre d'environ 70 km, 200 millions d'années, laisserait la trace d'une telle chute. L'âge de ce cratère pose problème : les dernières analyses géochimiques indiquent qu'il daterait du Norien moyen. Des taux d'iridium anormalement élevés dans des couches de la fin du Trias ont aussi été signalés, indiquant un événement extraterrestre, mais ces observations ont été contestées.

En outre, les évolutions de la faune à la fin du Trias sont différentes de celles que l'on observe à la fin du Crétacé : il y a 65 millions d'années, les catégories d'animaux les plus fortement touchées ont été les herbivores. Les quantités de poussières soulevées par l'impact d'une météorite auraient empêché la lumière solaire d'atteindre la surface de la Terre : la photosynthèse aurait été bloquée, privant les herbivores de nourriture. En revanche, les herbivores qui dominent juste après la crise Trias-Juras-



7. À L'EXTRÊME FIN DU TRIAS, selon les fossiles découverts à Provençhères-sur-Meuse, la transgression rhétienne favorise le développement de reptiles marins tels les plésiosaures (au premier plan) et les ichthosaures (à l'arrière-plan) qui ressemblent au dauphin.

Des poissons au corps très élevé et possédant des dents très saillantes, nommés *Sargodon*, apparaissent aussi à cette époque. *Saurichthys*, un poisson filiforme, et *Hybodus* (l'arrière-plan à gauche), un requin primitif, existaient quant à eux dès le début du Trias.

sique sont les prosauropodes, les tritylodontes et les ornithischiens. Prosauropodes et tritylodontes sont des lignées en voie d'extinction à la fin du Norien, et les ornithischiens existaient déjà à la fin du Trias. Les seuls herbivores à s'éteindre dans cette période sont les aëosaures et les trilophosaures, lignées déjà anciennes, ayant survécu à la crise Carnien-Norien et probablement affaiblies. L'attribution de cette crise à la chute d'une météorite est donc sans fondement.

La transition du Trias au Jurassique est marquée par une crise brutale en Europe à la limite Carnien-Norien et par un simple réaménagement des faunes à la fin du Trias. En Amérique du Nord, on observe l'inverse. À une échelle globale, on observe l'extinction de lignées majeures à la limite Carnien-Norien, mais aussi à l'extrême fin du Trias. Toutefois dans la première partie du Jurassique, l'Hettangien, le niveau des mers était élevé : nous trouvons surtout des sédiments marins pour cette période. L'Hettangien est

en outre difficile à distinguer des autres périodes dans les environnements terrestres, comme en Amérique du Nord ou en Chine. Comment en ce cas être assuré de l'extinction de certaines lignées à la limite entre le Trias et le Jurassique? On a ainsi retrouvé dans les carrières d'Hettange, en Lorraine, des dents de phytosaure. Ce site est pourtant considéré comme la limite qui définit l'Hettangien : les phytosaures, contrairement à ce que l'on croyait jusqu'à présent, ne se seraient-ils pas éteints à la fin du Trias? Peut-être ces fossiles ont-ils été déposés durant le Trias, arrachés à la roche par un cours d'eau au début du Jurassique.

La corrélation exacte des formations géologiques situées sur des continents différents est aussi difficile. Ce que l'on nomme Rhétien en Amérique du Nord représente-t-il la même période que ce que l'on nomme Rhétien en Europe? De telles incertitudes peuvent-elles modifier notre vision globale des événements

de la fin du Trias? Seule la découverte de nouveaux sites fossilifères à travers le monde nous permettra de répondre à ces questions, car la paléontologie est avant tout une science de terrain.

Gilles CUNY est paléontologue au Département de géologie de l'Université de Bristol.

Les dinosaures, Dossier Pour la Science, septembre-novembre 1993.

The Beginning of the Age of Dinosaurs : Faunal Change across the Triassic-Jurassic Boundary, sous la direction de Kevin Padian, Cambridge University Press, 1986.

Louis de BONIS, *Évolution et extinction dans le règne animal*, Masson, 1991.

Eric BUFFETAUT, *Grandes extinctions et crises biologiques*, Monthe, 1992.

Jean-Michel MARTIN et Gilles CUNY, *Le téosaure et l'histoire des dinosaures*, Cercle Girardot, Lons-le-Saunier, 1992.

In the Shadow of the Dinosaurs : Early Mesozoic Tetrapods, sous la direction de Nicholas C. Fraser et Hans-Dieter Sues, Cambridge University Press, 1994.

L'origine des glaciations

WALLACE BROECKER

Dans le passé, les températures sur Terre ont varié de plus de dix degrés en quelques dizaines d'années seulement. De tels sauts climatiques auront-ils encore lieu ?

Les 10 000 dernières années ont été exceptionnelles dans l'histoire de notre planète : jamais, depuis 100 000 ans, le climat n'avait été si régulier ni si stable. Des carottages dans la glace du Groenland ont révélé, pendant la dernière glaciation, une série de vagues de froids et de réchauffements qui ont élevé ou abaissé la température hivernale moyenne, en Europe du Nord, d'environ dix degrés en seulement dix ans. Ces brusques changements sont indiqués par les poussières atmosphériques, et les quantités de méthane et de précipitations conservées dans les couches de glace.

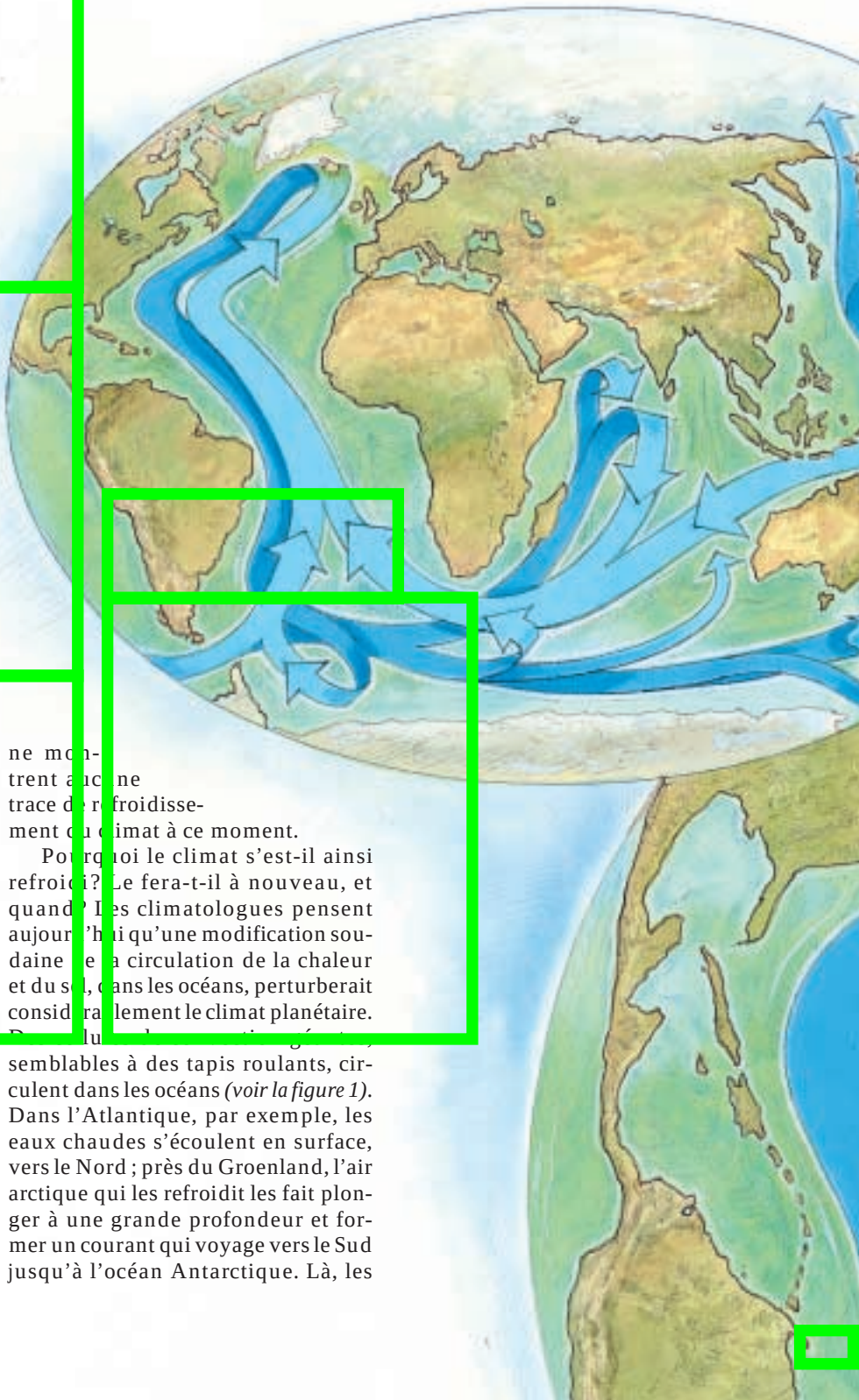
La dernière véritable période froide, longue d'un millier d'années et nommée Dryas récent (le dryas est une fleur de toundra dont l'habitat s'est considérablement étendu à cette époque), a duré environ 1 000 ans. On en trouve des traces dans les sédiments marins de l'Atlantique Nord, dans les glaciers morainiques de Scandinavie et d'Islande, et dans les lacs et les marécages maritimes du Canada et d'Europe du Nord. Le Nord-Ouest des États-Unis a aussi connu un refroidissement important.

De nombreuses observations indiquent que le refroidissement du Dryas récent touchait toute la planète. Le réchauffement du plateau polaire de l'Antarctique pendant cette période, les glaciers de Nouvelle-Zélande ont avancé et, dans le Sud de la mer de Chine, les proportions des diverses espèces de plancton ont changé radicalement. La concentration en méthane dans l'atmosphère a diminué de 30 pour cent. Seuls les relevés de pollens effectués dans certaines parties des États-Unis

ne montrent aucune trace de refroidissement du climat à ce moment.

Pourquoi le climat s'est-il ainsi refroidi ? Le fera-t-il à nouveau, et quand ? Les climatologues pensent aujourd'hui qu'une modification soudaine de la circulation de la chaleur et du sel, dans les océans, perturberait considérablement le climat planétaire.

Des courants océaniques semblables à des tapis roulants, circulent dans les océans (voir la figure 1). Dans l'Atlantique, par exemple, les eaux chaudes s'écoulent en surface, vers le Nord ; près du Groenland, l'air arctique qui les refroidit les fait plonger à une grande profondeur et former un courant qui voyage vers le Sud jusqu'à l'océan Antarctique. Là, les



eaux profondes, plus chaudes et moins denses que les eaux glacées de la surface, remontent, mais, comme elles sont alors refroidies jusqu'à presque geler, elles replongent dans les abysses. Les courants profonds de l'océan Antarctique, les plus denses du monde, s'écoulent vers le Nord, dans les océans Atlantique, Pacifique et Indien, puis finissent par s'écouler vers le Sud, et le cycle se répète. Dans les océans Pacifique et Indien, le courant de fond dirigé vers le Nord est contrebalancé par un mouvement vers le Sud des

eaux de surface. Dans l'Atlantique, ce courant est rapidement

arrêté par le puissant tapis roulant qui, au fond, se dirige vers le Sud.

L'Atlantique Nord plus salé que le Pacifique

Dans l'Atlantique Nord, les eaux qui arrivent du Sud s'enfoncent dans les abysses. Dans le Pacifique, cet enfoncement n'a pas lieu, parce que les eaux de surface de l'Atlantique sont plus salées de quelques pour cent que celles du Pacifique : en raison de la disposition géographique de la montagne des Amériques, de l'Europe et de l'Afrique, l'air s'humidifie lorsqu'il traverse le bassin Atlantique ; l'humidité provient de l'océan, dont les vagues et les courants concentrent en sel, ce qui les densifie. Elles plongent alors dans l'Atlantique Nord et amorcent une circulation globale qui redistribue le sel.

La circulation atlantique, dont le débit est environ 100 fois supérieur à celui de l'Amazone, transporte de la chaleur : l'eau qui

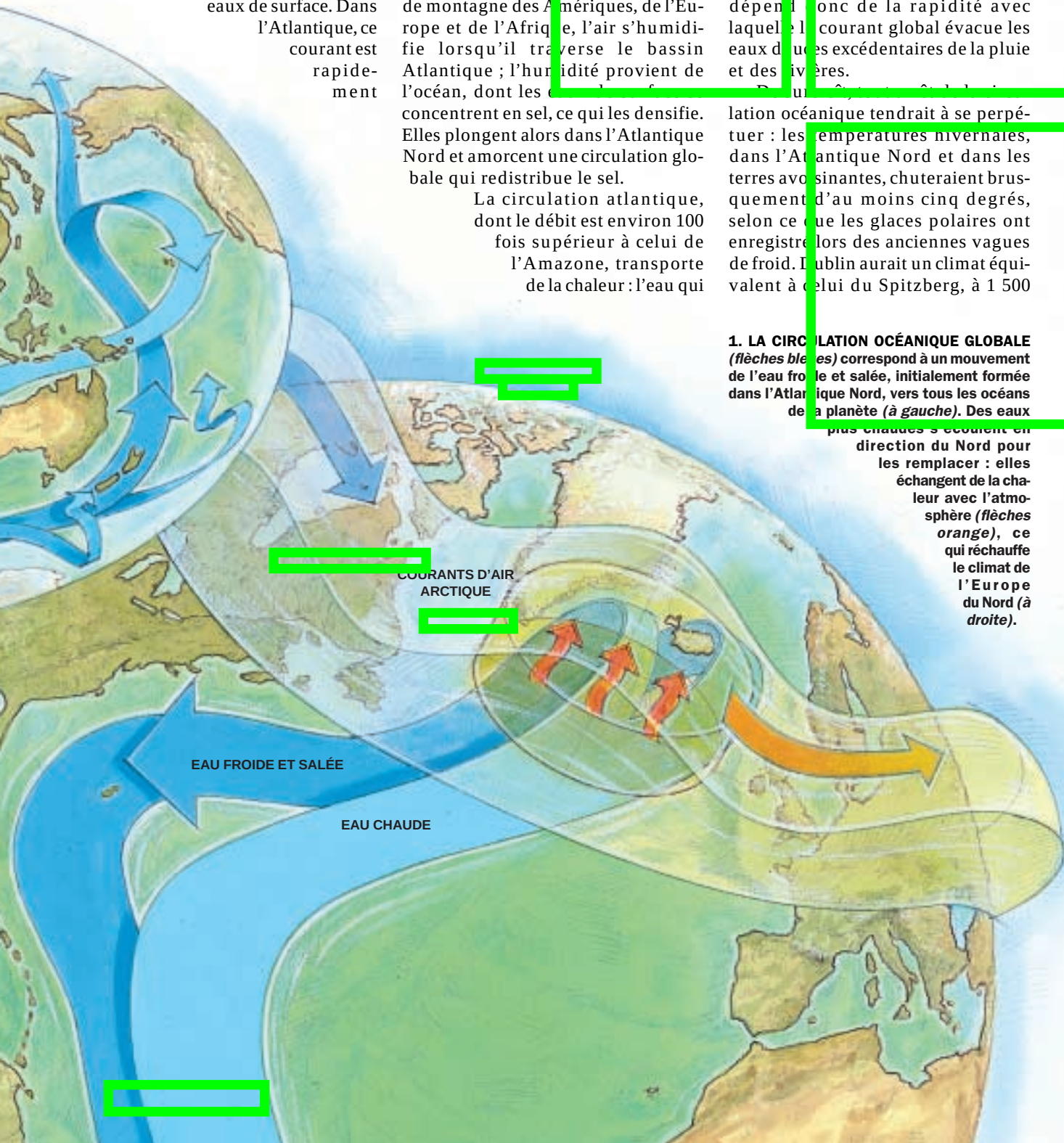
s'écoule vers le Nord est, en moyenne, plus chaude de huit degrés que celle qui se dirige vers le Sud. Le transfert de cette chaleur aux masses d'air de l'Arctique, au-dessus de l'Atlantique Nord, explique le climat anormalement chaud de l'Europe.

Des apports excessifs d'eau douce dans l'Atlantique Nord perturbent cette circulation. Aux latitudes élevées, les précipitations et l'écoulement continental sont plus importants que l'évaporation : la salinité des eaux de surface de l'Atlantique Nord dépend donc de la rapidité avec laquelle le courant global évacue les eaux douces excédentaires de la pluie et des rivières.

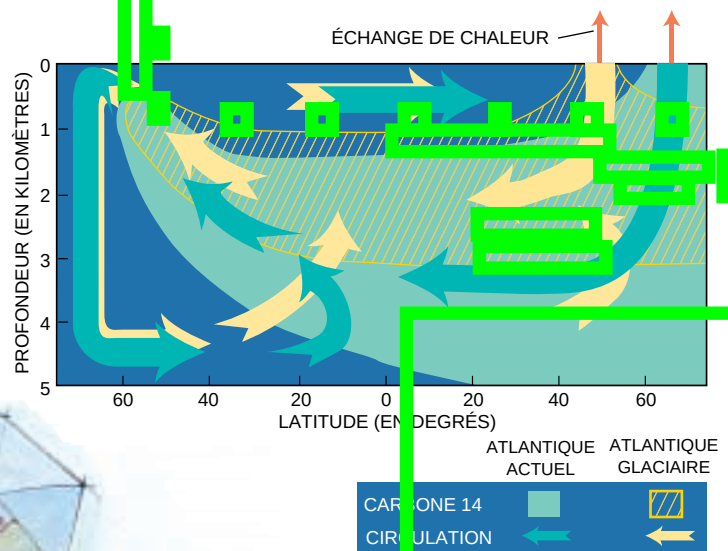
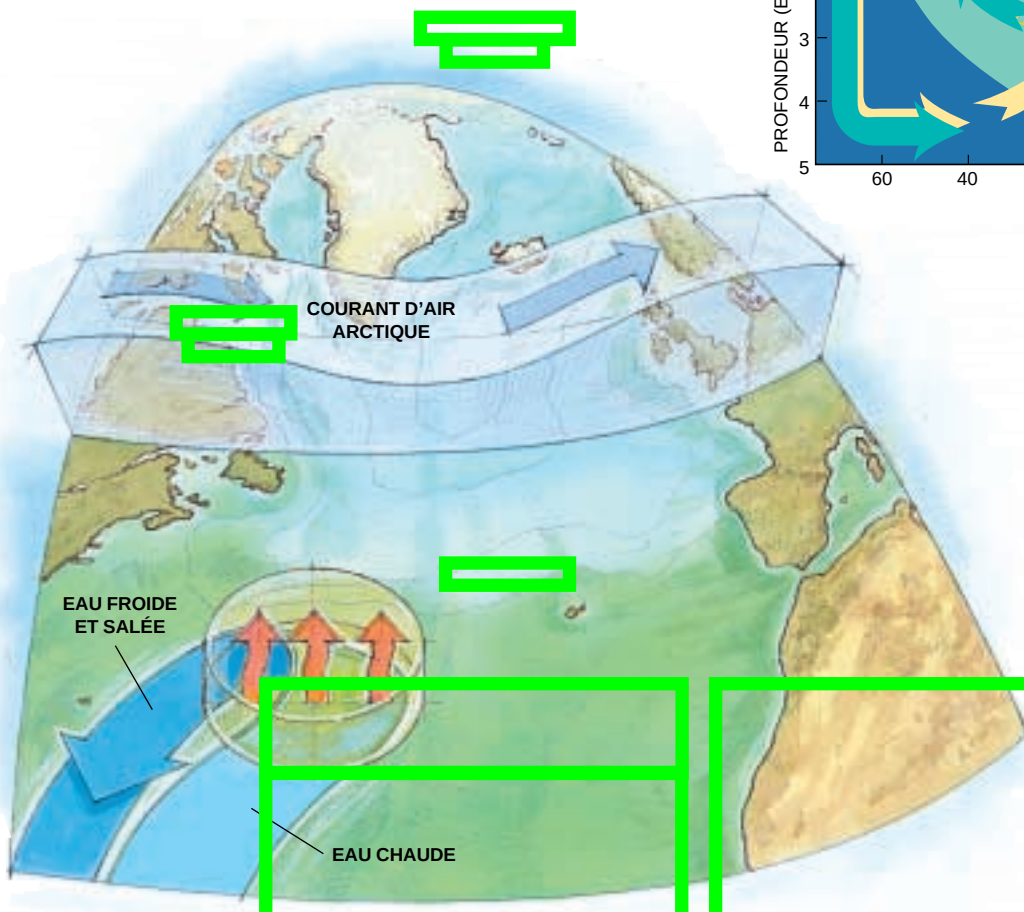
Si la circulation océanique tendrait à se perpétuer : les températures hivernales, dans l'Atlantique Nord et dans les terres avoisinantes, chuteraient brusquement d'au moins cinq degrés, selon ce que les glaces polaires ont enregistré lors des anciennes vagues de froid. Dublin aurait un climat équivalent à celui du Spitzberg, à 1 500

1. LA CIRCULATION OCÉANIQUE GLOBALE (flèches bleues) correspond à un mouvement de l'eau froide et salée, initialement formée dans l'Atlantique Nord, vers tous les océans de la planète (à gauche). Des eaux

plus chaudes s'écoulent en direction du Nord pour les remplacer : elles échangent de la chaleur avec l'atmosphère (flèches orange), ce qui réchauffe le climat de l'Europe du Nord (à droite).



2. UNE CIRCULATION SECONDAIRE, à la latitude de l'Europe méridionale, ne transférerait pas de chaleur aux vents de l'Atlantique Nord. Les températures en Europe, lors des périodes froides, où ce courant existait, étaient, en moyenne, inférieures de dix degrés aux températures actuelles. Cette circulation secondaire est moins profonde que la circulation principale (à droite).



atomes contiennent des nombres différents de neutrons) dans les coquilles des foraminifères benthiques, animaux minuscules qui vivent dans les profondeurs. Les eaux profondes de la circulation de l'Atlantique Nord sont pauvres en cadmium et riches en carbone 13 ; dans les autres eaux profondes de l'océan, c'est l'inverse. Les différences d'abondances sont dues à la migration des organismes aquatiques, qui réduit la concentration en carbone 13 et augmente la concentration en cadmium. Pendant les périodes de grand froid sur l'Atlantique, la concentration en cadmium a chuté de moitié, et la concentration moyenne et a augmenté fortement dans les eaux de fond ; la proportion relative de carbone 13 et de carbone 12 a varié à l'opposé. Ces variations sont expliquées par le modèle de S. Rahmstorf, qui stipule que la circulation était alors à une profondeur inférieure, les eaux les plus profondes

kilomètres du pôle Nord. En outre, une telle variation surviendrait en dix ans au plus.

Puis, après des centaines ou des milliers d'années, la circulation reprendrait parce que la diffusion de la chaleur, des parties les plus chaudes de l'océan, et la diffusion du sel, du fond vers la surface, réduisant la densité de l'eau abyssale stagnante jusqu'à ce que les eaux de surface de l'une ou l'autre des régions polaires s'y mélangent à nouveau, rétablissant le brassage de la chaleur et du sel. Cette fois-ci, la circulation ne serait pas nécessairement identique à celle d'aujourd'hui : elle dépendrait de l'écoulement d'eau douce dans chaque région polaire.

Selon les simulations de Stefan Rahmstorf, de l'Université de Kiel, l'arrêt de la circulation globale serait suivi de la formation d'un autre courant, moins profond, dont les eaux

froides plongerai-ent au Nord des Bermudes et l'Europe du Nord recevrait moins de chaleur. Cette circulation secondaire serait aussi arrêtée par un afflux d'eau douce, mais elle reprendrait spontanément après quelques dizaines d'années seulement. S. Rahmstorf n'explique toutefois pas comment la circulation principale se rétablirait ensuite.

Le cadmium et le carbone 13

Deux caractéristiques du modèle de S. Rahmstorf intéressent particulièrement les paléoclimatologues. Tout d'abord, il explique les variations, au cours des périodes de refroidissement, des concentrations en cadmium et en isotopes du carbone (les différentes formes de cet élément, dont les

Ensuite l'existence d'une circulation secondaire expliquerait la poursuite du transfert du carbone 14 vers les eaux profondes, pendant les périodes froides. Si ce transfert avait cessé, les datations obtenues par dosage du carbone 14 montreraient que les datations obtenues par dosage du carbone 14 ne seraient pas le cas. Un quart seulement du carbone monovalent est aujourd'hui dans les couches supérieures des océans et dans l'atmosphère ; le reste est dans les abysses. La répartition du carbone 14, qui est formé dans l'atmosphère par les rayons cosmiques, dépend de la circulation océanique. Aujourd'hui, dans les océans, le carbone 14

atteint les eaux profondes grâce à la circulation globale. Elles plongent pendant qu'elles vont du Sud au Nord, les eaux chaudes de surface dissolvent de l'air qui contient du carbone 14. Elles entraînent cet élément lorsqu'elles plongent dans les abysses. Bien que les eaux profondes remontent brièvement à la surface près de l'Antarctique, peu de carbone 14 se dissout à cet endroit.

Un ralentissement de la circulation globale ferait notablement varier l'abondance du carbone 14 dans l'atmosphère et dans l'océan. La proportion de carbone 14 par rapport au carbone 12 (isotope stable, contrairement au premier qui est radioactif), est, au fond des océans, environ 12 pour cent inférieure à celle des couches supérieures de l'océan et de l'atmosphère : le carbone 14 se désintègre lors de son transport et de son séjour au fond. Simultanément, les rayons cosmiques régénèrent le carbone 14, à raison de un pour cent du total présent sur Terre tous les 82 ans. Si les échanges entre les couches supérieures et inférieures des océans s'arrêtent, la proportion de carbone 14 dans les couches supérieures de l'océan et dans l'atmosphère augmenterait de cinq pour cent par siècle, parce que le carbone 14 ne serait pas entraîné dans les eaux profondes. Dans ces conditions, après un millénaire, la proportion de carbone 14 dans l'atmosphère aurait augmenté d'un tiers.

Un tel phénomène perturberait fortement les résultats des datations au carbone 14. Les paléontologues déterminent l'âge des fossiles en mesurant leur contenu résiduel en carbone 14 : plus il est faible, plus le spécimen est ancien. La quantité de carbone 14 présente dans une plante vivante dépend de la proportion de cet isotope dans l'atmosphère ou dans les océans à l'époque où cette plante vit. Les plantes qui auraient poussé pendant un arrêt des échanges entre l'atmosphère et les eaux profondes contiendraient plus de carbone 14 et sembleraient plus jeunes qu'elles ne le seraient en réalité. Selon la datation au carbone 14, les plantes des périodes froides marquées par un arrêt de la circulation globale sembleraient contemporaines de celles qui

ont vécu 10 000 ans plus tard, au cours d'une période chaude.

La circulation permanente du carbone 14

Bien que la quantité de carbone 14 dans l'atmosphère ait un peu fluctué au cours du temps, la datation au carbone 14 des sédiments marins qui se sont accumulés de manière uniforme pendant les 20 000 dernières années. Le surcroît, des datations absolues de coraux par mesure de l'abondance de l'uranium et du thorium, indiquent même que, à la fin du Dras récent, à l'époque où la circulation globale aurait repris, la concentration atmosphérique en carbone 14 a augmenté.

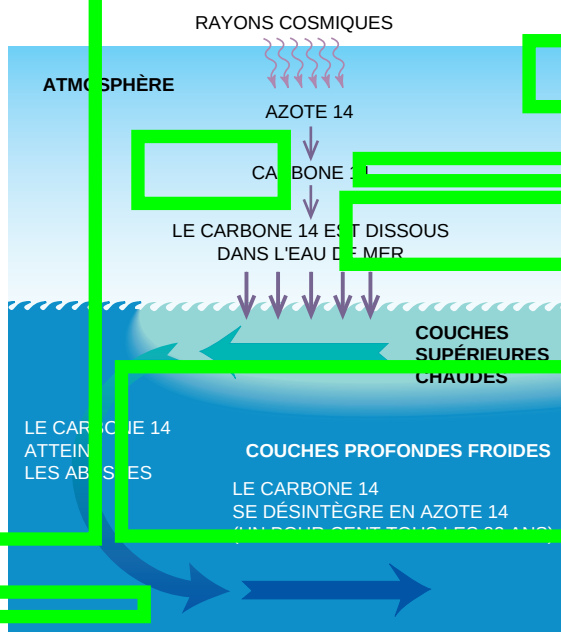
Cette observation semble révéler que les arrêts de la circulation globale n'auraient pas duré plus d'un siècle et qu'ils auraient été suivis par des périodes de circulation normale. En particulier, au Dras récent, la circulation des océans a plutôt augmenté. Comme on aurait pu le prévoir si un arrêt complet de la circulation était responsable du froid. Toutefois si la circulation s'était arrêtée, nous devrions envisager d'autres modes de transport du carbone 14 vers les eaux profondes.

Si les afflux d'eau douce expliquent les arrêts de la circulation globale et la survenue des glaciations, d'où vient cette eau douce? Sans doute des calottes glaciaires polaires : ces brusques variations du climat semblent limitées à des périodes où d'épaisses couches de glace recouvraient le Canada et la Scandinavie.

Nous connaissons les traces d'au moins huit afflux d'eau douce dans l'Atlantique Nord : sept résultent de la libération d'une armada d'icebergs par la partie orientale de la calotte glaciaire de la baie d'Hudson ; la huitième provient de l'écoulement d'un énorme lac. Au début du Dras récent (10 000 ans avant H. n. e.), de l'Université de Göttingen a découvert une série de couches sédimentaires à structure particulière dans l'Atlantique Nord. Ces couches, qui s'étendent de la mer du Labrador aux îles Britanniques, résultent probablement de la fonte d'un nombre considérable d'icebergs venus du Canada.

Les débris entraînés et déposés par cette armada s'amincissent vers l'Est, de 50 centimètres d'épaisseur dans la mer du Labrador à quelques centimètres dans l'Atlantique Est. Les plus grosses particules contenues dans les sédiments sont surtout issues des roches calcaires sédimentaires et du lit de roches éruptives de la baie d'Hudson et de la zone avoisinante. Les coquilles de foraminifères sont rares dans ces couches, ce qui évoque un océan encombré de glaces (qui réduisent la prolifération du plancton), et la proportion réduite d'oxygène 18 par rapport à l'oxygène 16 dans les sédiments, ce qui prouve que les animaux vivaient dans de l'eau au moins salée que la normale. La pluie et la neige contiennent peu d'oxygène 18, à ces hautes latitudes, parce que les molécules d'eau qui contiennent cet élément se condensent en premier, avant d'arriver dans ces régions.

Le huitième afflux d'eau douce est d'origine asiatique, qui était créé par le poids de la calotte glaciaire en recul. Jadis, l'eau du lac se déversait, par dessus un rebord rocheux, dans le bassin du Mississippi, jusque dans le golfe du Mexique, mais le recul du front glaciaire, il y a environ 12 000 ans, a ouvert une seconde voie d'écoulement, à



3. LE CARBONE 14 est formé dans l'atmosphère par les rayons cosmiques. Il est entraîné au fond de l'océan par les eaux qui plongent dans les abysses. La datation au carbone 14 indique indirectement l'état de la circulation océanique : tout arrêt prolongé de ce courant provoquerait une accumulation de carbone 14 dans l'atmosphère, ce qui perturberait les datations.

l'Est : le niveau du lac a considérablement diminué. L'eau ainsi libérée s'est déversée au Sud du Canada, dans la vallée aujourd'hui occupée par le Saint-Laurent, et a abouti dans la région de l'océan où se forment aujourd'hui les eaux profondes.

Des vagues de froid de plus en plus accentuées

La relation entre ces événements et les variations climatiques locales est claire. Quatre d'entre eux correspondent à des changements importants du climat du Bassin Nord-Atlantique. L'une des couches de S. Heinrich marque la fin de l'avant-dernier cycle

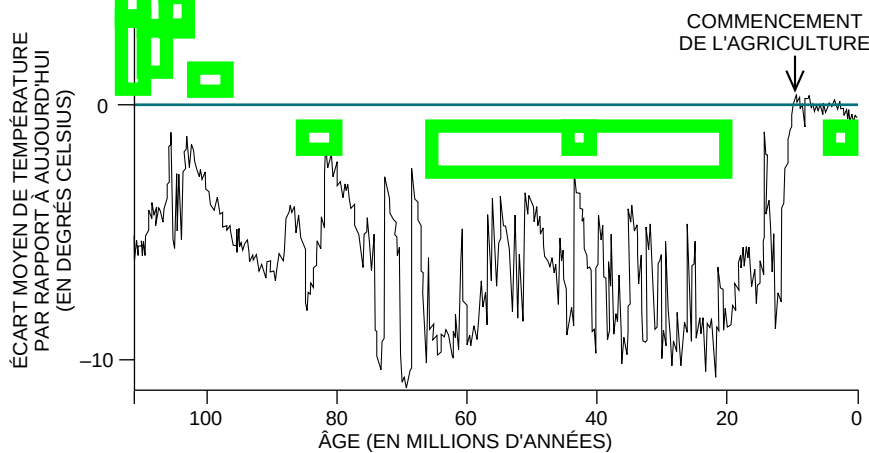
glaciaire principal, et une autre indique le plus récent. Une troisième couche correspondrait au début du Dryas récent. Chacune des quatre autres couches correspond à un sous-cycle climatique. La corrélation de ces couches et des relevés des carottes glaciaires du Groenland a révélé que les refroidissements

caractérisée par des vagues de froid de plus en plus sévères, dont la plus forte correspond à une couche de S. Heinrich. Le climat se réchauffait ensuite : un nouveau cycle démarrait.

Les variations climatiques du Dryas récent ont été ressenties dans le monde entier. En est-il de même pour les 15 événements similaires,

antérieurs, indiqués par les carottes glaciaires ? À ce jour, deux éléments seulement confirment cette hypothèse, mais ils sont convaincants. D'une part, Jérôme Chappellaz, du Laboratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement du CNRS, a analysé l'air emprisonné dans

Groenland et observé que les périodes glaciaires sont accompagnées d'une diminution de la concentration atmosphérique en méthane. Le méthane est produit surtout dans les marais et dans les marécages. Comme ceux des régions tempérées de l'hémisphère Nord étaient gelés ou ensevelis sous la glace, le méthane devait provenir



4. LES CAROTTES DE GLACE (à droite) révèlent la variabilité du climat de la Terre au cours des 100 000 dernières années (en haut, à gauche). Les climatologues qui ont foré jusqu'au socle rocheux du centre de la calotte glaciaire du Groenland (ci-dessus), ont mesuré les concentrations relatives en oxygène 18 et en oxygène 16 dans les échantillons. L'abondance de l'oxygène 18 dans la vapeur d'eau atmosphérique dépend de la température de l'air : plus le climat est froid, moins l'eau qui contient cet isotope de l'oxygène est présente. Des photographies d'une section de carotte, prises au microscope en lumière polarisée, révèlent les cristaux de glace (en haut, à droite) et montrent les bulles d'air emprisonnées dont l'analyse nous permet de connaître la composition de l'atmosphère préhistorique (au milieu, à droite). Les couches inférieures (en bas, à droite) ont été déformées par le glissement de la calotte glaciaire sur le sol rocheux du Groenland, rendant les relevés précis difficiles, voire impossibles.



des tropiques. Les fluctuations dans les relevés de méthane indiquent que les tropiques ont connu une période de sécheresse pendant chaque période de refroidissement de l'hémisphère Nord.

D'autre part, une carotte sédimentaire prélevée à 500 mètres au-dessous du bassin de Santa Barbara, a révélé que des bandes de sédiments intacts, avec des couches annuelles bien marquées, alternaient avec des sections perturbées par des vers fous. La présence de vers indique que les eaux profondes de la région contenaient suffisamment d'oxygène pour permettre la vie. Ces périodes sont étrange-

ment corrélées avec les refroidissements du Groenland : les variations de la circulation océanique ont atteint toute la planète.

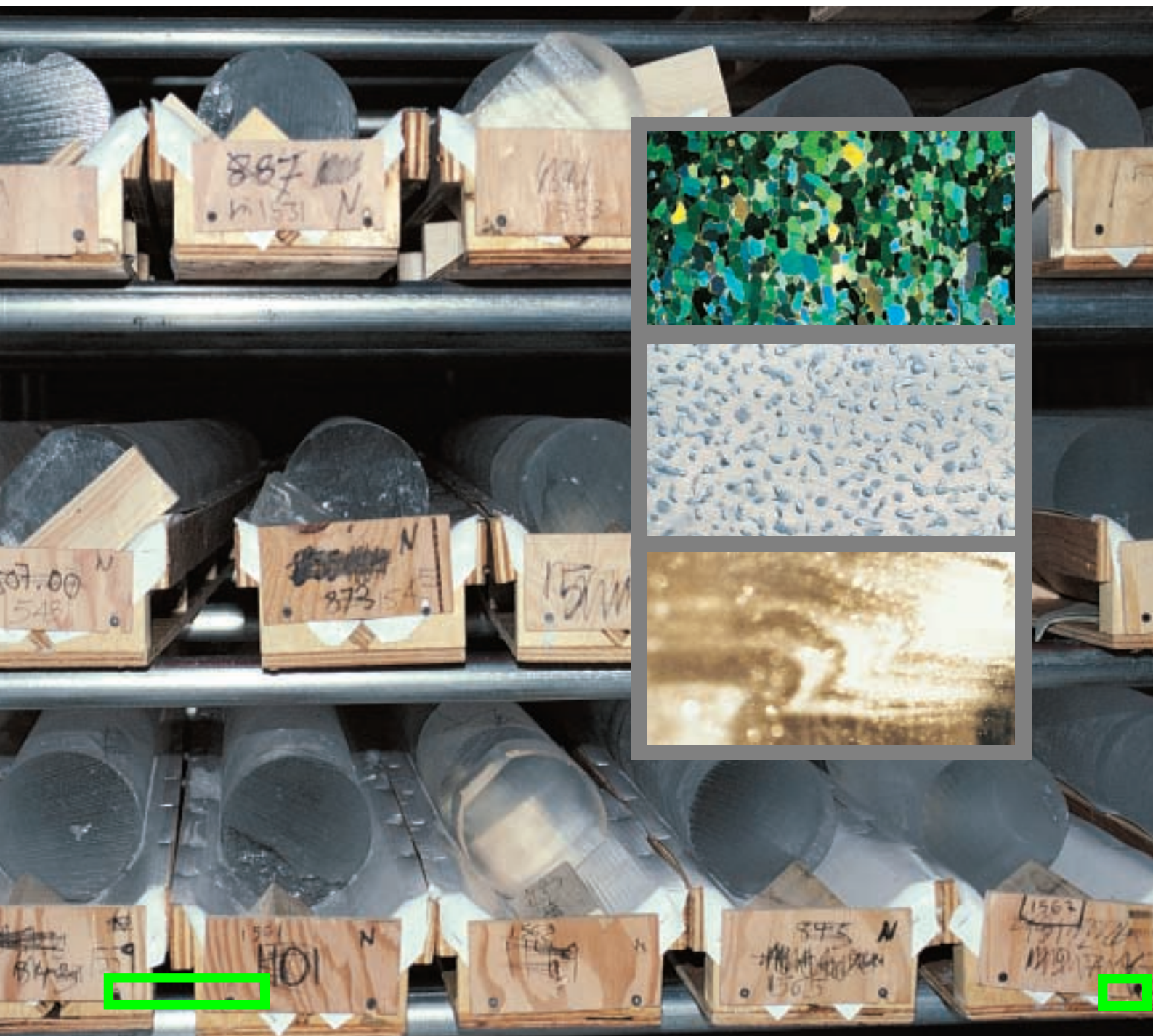
Un changement mondial du climat

événements découverts par S. Heinrich sont encore plus surprenantes. Selon les analyses du pollen extrait des sédiments du lac Tulane, en Floride, le rapport entre les abondances de pin et de chêne a brusquement augmenté lors de chacun de ces événements. Les pins prospèrent dans des climats relativement humides, tandis

que les chênes préfèrent les climats secs. Bien que la relation exacte entre l'abondance des pins et les événements de S. Heinrich ne soit pas encore précisément connue, ces relevés indiqueraient une période humide par cycle. Dans l'hémisphère Sud, on trouve aussi des corrélations : chacun des quatre événements de S. Heinrich correspond

être daté par la méthode au carbone 14 correspond à une extension maximale des glaciers montagneux des Andes.

Que la fonte massive des glaciers canadiens ait eu des conséquences sur tout le Globe est paradoxal car, selon les modèles de circulation atmosphérique, les changements dans les



Le méthane dans les glaces

L'analyse du méthane dans les bulles de glace polaire permet de reconstituer l'évolution de sa concentration dans l'atmosphère terrestre. Grâce au forage européen GRIP, réalisé au sommet du glacier qui couvre le Groenland, nous avons mesuré la concentration en méthane des 40 000 dernières années. Cette concentration temporelle comprise entre quelques dizaines et quelques centaines d'années. Ces mesures détaillent un précédent enregistrement des variations de la concentration en méthane de l'atmosphère qui couvre plus de 200 000 ans, obtenu grâce au forage VOSTOK en Antarctique.

Au cours de la dernière glaciation, il y a 110 000 à 15 000 ans environ, le climat s'est réchauffé par épisodes (qui n'ont pas fait fondre les calottes glaciaires) de 500 à 12 000 ans chacun. Lors de chacun de ces épisodes, la concentration en méthane a fortement augmenté dans l'atmosphère, passant de 400 à 550 parties par milliard en volume environ. Une telle augmentation résulte d'un dégagement anormal supplémentaire de 30 à 40 millions de tonnes de méthane. Le méthane naturel provient à 75 pour cent des sols saturés en eau, marécages et tourbières, qui sont aujourd'hui répartis en deux bandes de latitude, l'une boréale, entre 50 et 70 degrés de latitude Nord, l'autre subtropicale, entre 20 degrés de latitude Nord et 30 degrés de latitude Sud. Comme les zones boréales étaient couvertes de glace pendant la dernière glaciation, les variations rapides

de la concentration en méthane indiquent de brusques changements de l'étendue des zones marécageuses sous les tropiques. Ainsi faut-il voir dans ces fluctuations rapides de la concentration en méthane dans l'atmosphère groenlandaise les traces d'un réarrangement bien plus global du climat terrestre, à l'échelle de quelques décennies.

L'enregistrement de la concentration en méthane sur ces échelles de temps nous apporte d'autres enseignements importants : durant les 10 000 dernières années, alors que

le contenu en oxygène 18 des précipitations sur le Groenland indique un climat exceptionnellement stable, le méthane, à caractère plus global, montre l'existence d'événements climatiques notables. Il y a 8 200 ans, la concentration de l'atmosphère en méthane a diminué d'environ 70 parties par milliard en volume, pendant moins de 200 ans. Sur les derniers 10 000 ans, cette concentration a diminué jusqu'à 28 parties par milliard, puis elle a réaugmenté. Même si ces fluctuations apparaissent bien faibles par rapport à l'apport humain des derniers 200 ans, qui a fait augmenter de 150 pour cent la concentration de l'atmosphère en méthane, elles indiquent une variabilité climatique importante, notamment sous les tropiques.

Le dioxyde de carbone et l'oxygène 18 contenu dans l'oxygène atmosphérique apportent aussi des informations sur les brusques changements de la concentration en méthane pendant la dernière glaciation. Des mesures détaillées à partir de forages dans la calotte antarctique, montrent que la concentration en dioxyde de carbone a peu varié il y a entre 20 000 et 50 000 ans : ce gaz à effet de serre n'a donc pas été responsable de l'extension globale de ces brusques variations du climat.

L'oxygène 18 contenu dans l'oxygène atmosphérique est un signal global, qui a été utilisé comme marqueur pour corréler les couches de glace des carottes extraites au Groenland et en Antarctique. On a ainsi constaté que seuls les événements groenlandais qui ont duré plus de 2 000 ans ont laissé une trace dans le climat

de l'Antarctique. Les événements de réarrangements de la circulation dans l'Atlantique sur le climat du pôle Sud semblent donc atténués. Des forages effectués dans le Groenland

utilisant le méthane comme marqueur permettront d'élucider la relation entre les deux pôles au cours de ces fluctuations climatiques rapides.

Jérôme CHAPPELLAZ,
Laboratoire de glaciologie
et géophysique de l'environnement
du CNRS, Grenoble.

échanges de chaleur entre l'atmosphère et l'Atlantique Nord ne modifient les climats que localement. Quel mécanisme aurait étendu ces variations aux tropiques et aux régions méridionales des tempérées, voire à l'Antarctique ?

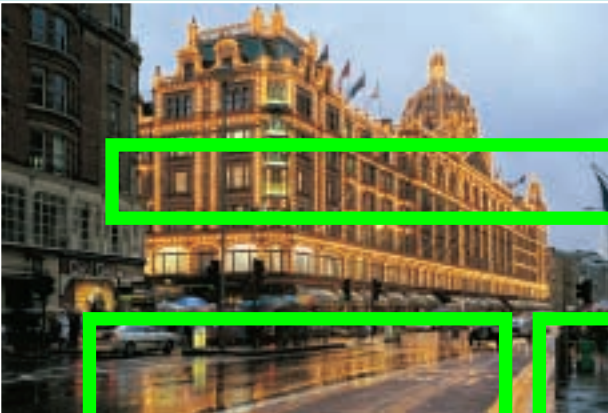
La répartition symétrique de ces variations climatiques autour de l'équateur souligne l'importance de ce qui se passe aux tropiques, et l'on comprend que ces modifications dans la dynamique de l'atmosphère tropicale auraient facilement des conséquences globales : les cellules de convection en saison sèche, qui se forment dans l'atmosphère tropicale aux points de rencontre des alizés, fournissent à l'atmosphère le principal gaz responsable de l'effet de serre, la vapeur d'eau. Bien que le lien entre la circulation océanique et la convection tropicale soit ténue, une modification de la circulation semble modifier la quantité d'eau froide qui est transportée vers l'équateur, dans le Pacifique. Une remontée des eaux modifie notablement les échanges de chaleur de la région, donc son climat. La réduction de cette remontée, comme on le constate lors des épisodes «El Niño», provoque des sécheresses dans certaines zones et des inondations dans d'autres.

«El Niño» pendant 1 000 ans

L'association des tropiques, mis en évidence par J. Chappellaz, n'est pas le seul argument en faveur de ce scénario. L'autre preuve spectaculaire provient du grand bassin de l'Ouest des États-Unis : immédiatement après le dernier événement de S. Heinrich il y a 12 000 ans, le lac Lahontan, dans le Nevada, a atteint sa taille maximale, dix fois supérieure à sa taille actuelle. Les précipitations sont considérables, d'un niveau comparable à celui qu'a connu la région lors de la période «El Niño» de l'hiver 1982-1983. Les périodes de sécheresse qui suivent

seraient-elles dues à des changements dans la circulation océanique qui auraient fait durer «El Niño» pendant 1 000 ans ?

Des découvertes plus récentes contribuent à confirmer que le climat tropical était très différent pendant les refroidissements. Des carottes de glace ancienne, prélevées à 6 000



5. LE CLIMAT DE L'EUROPE changerait considérablement si la circulation océanique était perturbée. Dublin (en haut à gauche) aurait en été le climat que connaît aujourd'hui le Saint-Petersbourg (en

haut à droite), et les hivers londoniens (en bas à gauche) seraient aussi froids que les hivers actuels à Irkoutsk, en Sibérie (en bas à droite).

mètres d'altitude dans les Andes tropicales, contiennent 200 fois plus de poussière fine que les échantillons les plus récents : il s'agit probablement de poussière transportée par les vents qui soufflaient sur une Amazonie aride. La glace la plus ancienne contient aussi de la poussière, mais celle qui s'est formée depuis 10 000 ans ; la température était inférieure d'environ dix degrés à celle d'aujourd'hui. En outre, la limite des glaces éternelles dans les Andes était 1 000 mètres plus bas qu'aujourd'hui : pendant les périodes de refroidissement, les tropiques étaient à la fois plus froides et plus sèches.

Notre compréhension partielle du passé ne nous permet pas de tirer des conclusions définitives en ce qui concerne l'avenir du climat. L'accumulation actuelle de gaz à effet de serre modifiera-t-elle la circulation océanique globale et le climat ? Selon les relevés paléoclimatiques, les brusques variations des climats passés ont été limitées à des périodes où l'Atlantique Nord était entouré d'immenses

couches de glace, pendant la dernière glaciation. Mais nous sommes loin de cette situation. Toutefois, l'ampleur de l'effet de serre provoqué par l'augmentation des gaz à effet de serre pourrait être plus grande qu'aucun autre événement au cours d'un intervalle de temps glaciaire, et l'on n'a pas de certitude que le système climatique global reste figé dans son mode actuel de fonctionnement.

Un arrêt de la circulation océanique ou une autre perturbation comparable sont improbables, mais si cela

se produisait, les conséquences seraient catastrophiques. La probabilité d'un tel événement atteindra son maximum dans 50 ou 150 ans, alors

qu'une population humaine nombreuse, menacée par la famine et par les maladies et qu'il faudra lutter pour préserver la vie sauvage de la pression toujours croissante sur l'environnement. Nous devons prendre cette éventualité au sérieux et faire tous les efforts possibles pour mieux comprendre le système climatique de notre planète.

Wallace B. BROECKER est professeur de géologie à l'Observatoire terrestre Lamont-Doherty de l'Université Columbia.

Wallace S. BROECKER et George H. DENTON, Les cycles glaciaires, in *Pour la Science*, n° 149, mars 1990.

W. DANSGAARD et al., Evidence for General Instability of Past Climate from a 250-KYR Ice-Core Record, in *Nature*, vol. 364, pp. 218-220, 15 juillet 1993.

D.R. MACAYEAL, A Low-Order Model

of the Heinrich Event Cycle, in *Paleoceanography*, vol. 8, n° 6, pp. 767-772, décembre 1993.

J. CHAPPELLAZ, T. BLUNIER, D. RAYNAUD, J.M. BARNOLA, J. SCHWANDER et B. STAUFFER, Synchronous Changes in Atmospheric CH₄ and Greenland Climate between 40 and 8 KYR BP, in *Nature*, vol. 366, pp. 443-445, 2 décembre 1993.

Jean-François MINSTER, *Les océans*, Éditions Flammarion, 1994.

Les mémoires holographiques

DEME TRI PSAITIS • FAI MOK

Après plus de 30 ans de recherches, les physiciens parviennent à utiliser l'holographie pour le stockage massif de données dans des mémoires très rapides

Le stockage optique des données est un domaine de recherche techniques des 15 dernières années : les disques compacts (CD) dominent aujourd'hui le marché de l'audiovisuel, enregistrant des textes, des images et des sons ; les utilisateurs d'ordinateurs personnels acquièrent des jeux vidéo, des journaux et des encyclopédies multimédia sous la forme de disques compacts.

Le stockage optique des données est indiscutablement aisé, peu coûteux et fiable. Les disques compacts contiennent environ 640 méga-octets, soit l'équivalent d'une heure et quart de musique à haute fidélité ou de 300 000 pages dactylographiées en double interligne. Néanmoins les utilisateurs apprécieraient des mémoires encore plus vastes et encore moins coûteuses : l'industrie voudrait enregistrer un ou plusieurs films sur un seul disque optique de la taille d'un disque compact ; les hôpitaux, les cabinets juridiques, les administrations et les bibliothèques ont besoin de mémoriser tant de données qu'ils ont recours à des « juke-box », dont le bras robotisé pioche parmi des centaines de disques.

Les ingénieurs de l'optique et de l'électronique ont répondu à ces demandes en essayant de tirer le maximum des systèmes à disques compacts. Certains étudient des lasers à semi-conducteurs, qui émettent des longueurs d'onde plus courtes que celles des lecteurs de disques actuels, afin d'augmenter la densité d'informations écrites sur les disques compacts ;

d'autres explorent les techniques de compression de données et de « super-résolution », qui permettent aussi une densité supérieure (au prix d'une augmentation du bruit de fond) ; d'autres envisagent des systèmes à multicouches, où plusieurs couches de stockage des données sont superposées et lues par un système optique que l'on focalise sur une couche particulière. D'ici cinq ans, ces perfectionnements devraient porter la capacité de stockage des disques compacts jusqu'à quelques dizaines de milliards d'octets (giga-octets).

Toutefois, pour enregistrer beaucoup plus de données – quelques centaines de milliards d'octets, par exemple, dans un disque –, on devra changer complètement de technique. Quelques équipes étudient une méthode prometteuse : l'holographie. L'idée remonte à 1964, lorsque Pieter van Heerden, de la Société *Polaroid*, proposa pour la première fois l'utilisation de cette méthode pour le stockage tridimensionnel de données. On pense aujourd'hui qu'une mémoire holographique pourrait stocker des centaines de milliards d'octets, à une vitesse supérieure à un milliard d'opérations par seconde.

Une donnée élémentaire, choisie au hasard, en moins de 100 microsecondes. Ces atouts ont incité de grandes compagnies comme *Rockwell*, *IBM*, *Thomson*, *Sony* ou *GTE* à s'intéresser de près à la mise au point des mémoires holographiques.

Quand les premières de ces mémoires seront commercialisées, leur



1. LES MÉMOIRES HOLOGRAPHIQUES sont des systèmes où l'information est stockée dans des cristaux de niobate de lithium à peine plus grand qu'un morceau de sucre (en avant-plan). Les hologrammes sont formés dans le cristal, par la rencontre d'un faisceau laser de référence, large et lumineux (à gauche), avec un faisceau qui contient les données, plus fin et plus faible (à droite).

coût et leur nouveauté les confineront probablement à une poignée d'applications spécialisées exigeant une capacité et une vitesse extraordinaires. De telles utilisations apparaissent déjà : un système de reconnaissance des

empreintes digitales de personnes autorisées à pénétrer dans des lieux d'accès restreint et ouvre un accès lorsque le doigt placé sur une plaque de verre est reconnu. Si les mémoires holographiques deviennent moins coûteuses, en satisfaisant un nombre croissant de tels besoins, elle pourront ensuite remplacer les disques optiques

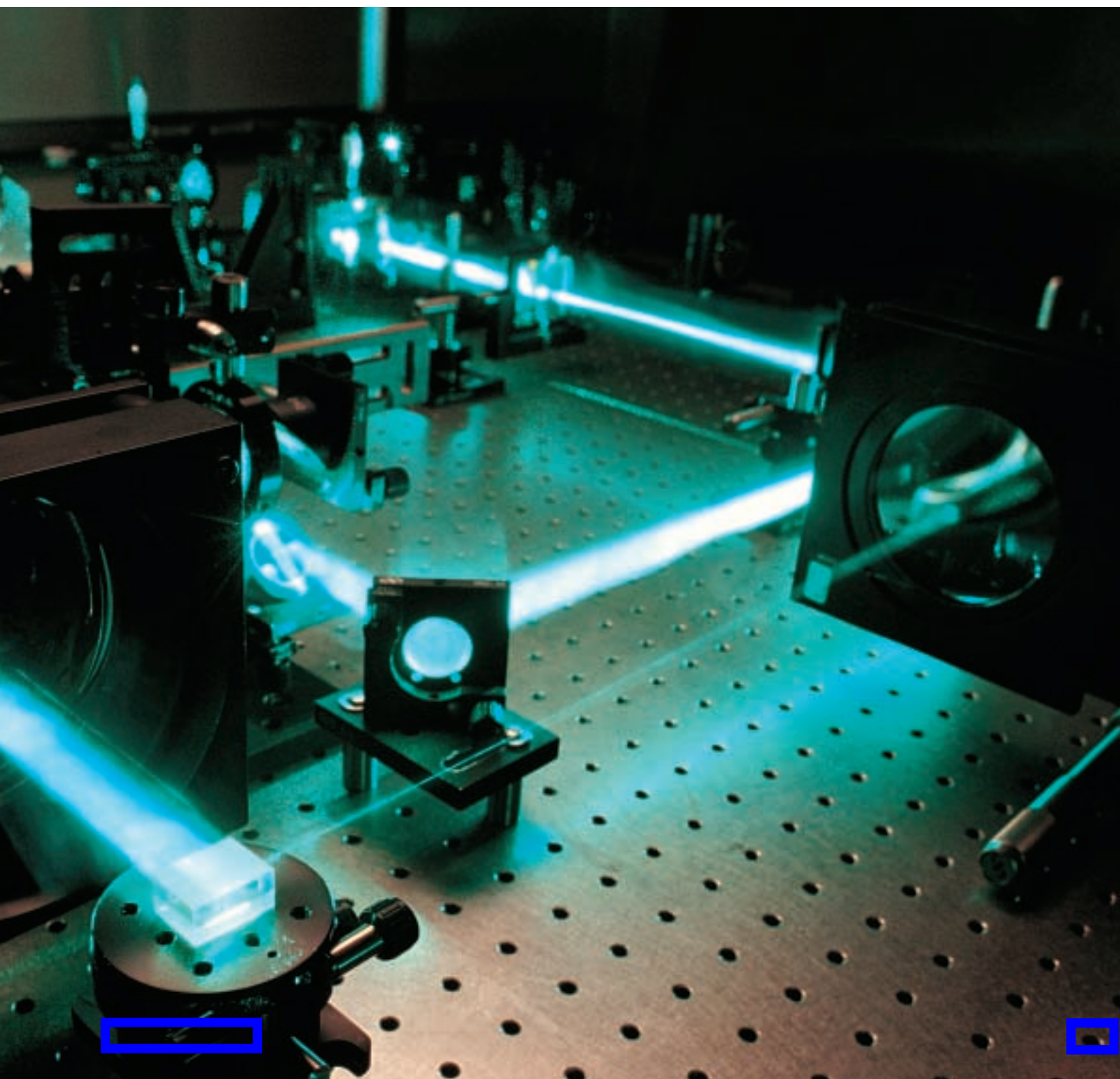
comme supports de stockage de données pour les ordinateurs personnels.

Cristal qui se souvient

Enregistrer et lire des données holographiques – sa haute densité et sa rapidité – résultent de l'enregistrement en trois dimensions et de la lecture page entière de données : dans les mémoires holographiques, chaque bit est stocké sous la forme d'une figure d'interférence particulière, répartie dans tout le volume du support. Cette figure, qui

s'enregistre sous la forme d'un réseau, se forme lorsque deux faisceaux laser interfèrent dans un matériau photosensible, c'est-à-dire dont les propriétés optiques sont modifiées par les faisceaux.

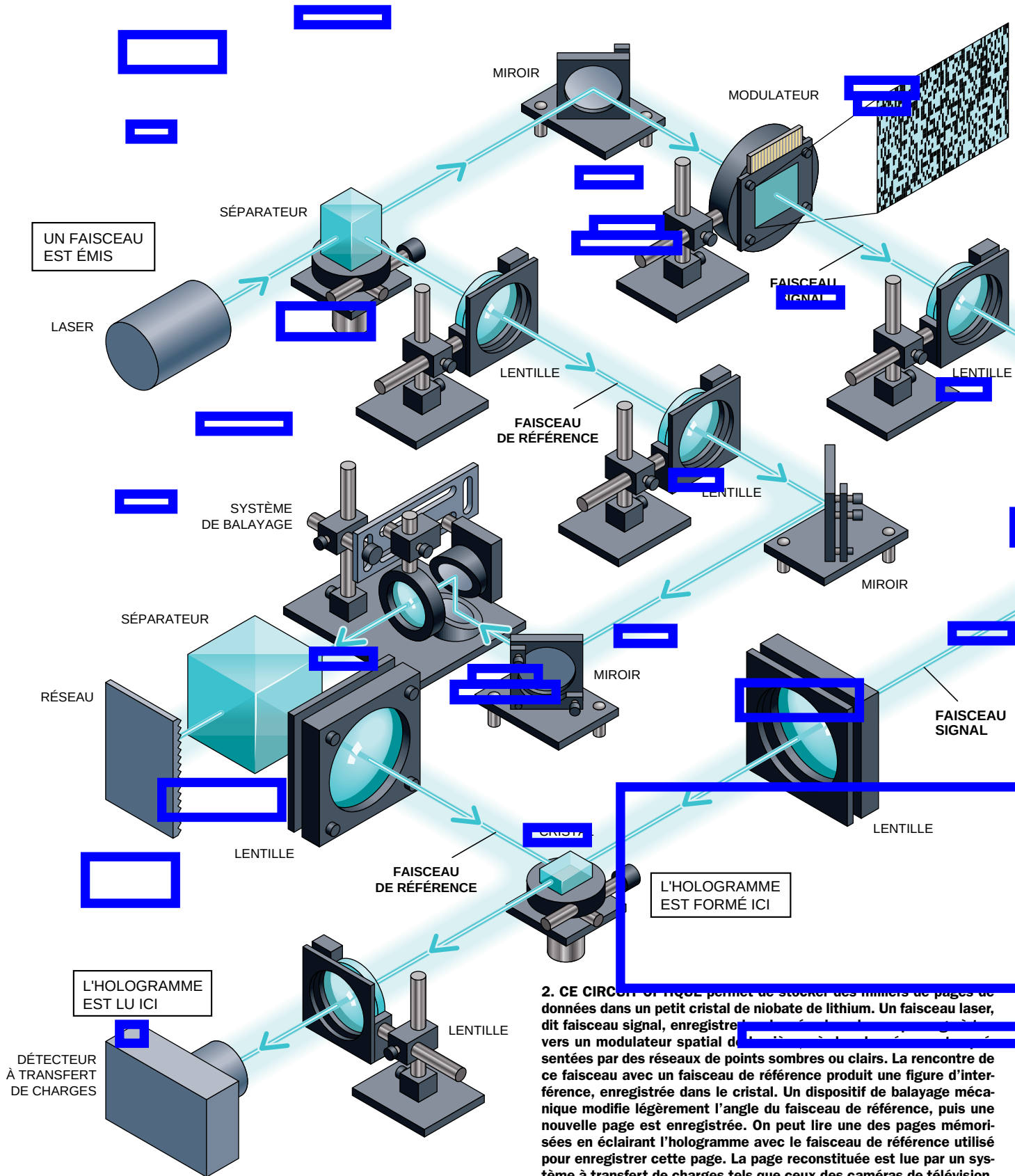
Avant d'être écrits dans le matériau photosensible, les bits doivent être affichés sur un petit écran à cristaux liquides sous la forme d'un réseau de carrés transparents ou opaques. Après la focalisation par des lentilles, un faisceau laser bleu-vert qui a traversé ce réseau, ou «page», forme un «faisceau signal». On obtient un holo-



gramme de la page de données en faisant interférer ce faisceau signal avec un autre faisceau, dit faisceau de référence, au sein du cristal photosensible. Le faisceau de référence doit être «col-

limaté» : toutes ses ondes lumineuses doivent être en phase, les maxima (et aussi les minima) traversant simultanément tout plan perpendiculaire à la direction de propagation (l'onde

lumineuse est dite **monochromatique** : la figure d'interférence produite par la rencontre du faisceau signal avec le faisceau de référence crée des zones de divers indices de réfraction au sein du cristal.



2. CE CIRCUIT OPTIQUE permet de stocker des milliers de pages de données dans un petit cristal de niobate de lithium. Un faisceau laser, dit faisceau signal, enregistré vers un modulateur spatial de données représentées par des réseaux de points sombres ou clairs. La rencontre de ce faisceau avec un faisceau de référence produit une figure d'interférence, enregistrée dans le cristal. Un dispositif de balayage mécanique modifie légèrement l'angle du faisceau de référence, puis une nouvelle page est enregistrée. On peut lire une des pages mémorisées en éclairant l'hologramme avec le faisceau de référence utilisé pour enregistrer cette page. La page reconstituée est lue par un système à transfert de charges tels que ceux des caméras de télévision.

On lit une page qui a été enregistrée de cette façon en envoyant à nouveau le faisceau de référence sur le cristal, suivant un angle d'incidence égal à celui de l'écriture des données : en traversant le cristal, le faisceau de référence est diffracté de telle façon qu'il reproduit l'ensemble des données ; il récupère ainsi l'information que celles-ci ont contenue. Pour lire sur un ensemble de détecteurs électro-optiques, qui mesurent les intensités lumineuses, on lit alors d'un coup toutes les informations de la page. On peut ensuite manipuler électroniquement les données par des circuits micro-électroniques classiques.

Pour fonctionner correctement, les systèmes holographiques doivent uti-

liser des faisceaux de lecture très voisins des faisceaux de référence utilisés pour l'écriture. Plus les cristaux sont épais, plus le faisceau de référence doit être précisément orienté : pour un cristal de un centimètre d'épaisseur, la reconstitution devient impossible dès que l'angle d'incidence varie d'un millième de degré. Loin d'être un inconvénient, cette particularité est exploitée dans la plupart des mémoires holographiques : on enregistre une première page de données dans le cristal ; puis, en augmentant l'angle d'incidence du faisceau de référence jusqu'à ce que la reconstruction d'une page précédente disparaisse, on enregistre une nouvelle page de données, et on répète ce « multiplexage angulaire » un grand nombre de fois. Pour visionner un des hologrammes enregistrés, il suffit d'éclairer le cristal à l'aide du faisceau de référence convenablement orienté.

Combien de pages peut-on graver dans un seul cristal ? Le nombre est prin-

cipalement limité par les propriétés dynamiques du matériau : à mesure que le nombre d'hologrammes occupant un même volume cristallin augmente, l'intensité de chacun diminue. Plus précisément, la fraction de lumière diffractée par chaque hologramme (et captée par les détecteurs électro-optiques) est inversement proportionnelle au carré du nombre d'hologrammes superposés : le rendement de diffraction, qui serait de un pour cent dans un cristal où l'on écrirait dix hologrammes, chuterait à 0,01 pour cent pour 1 000 hologrammes. Cet effet détermine le nombre maximal d'hologrammes qui peuvent être enregistrés dans un cristal. Les rendements finalement trop faibles pour être isolés du bruit de fond dû aux fluctuations d'intensité des lasers, de la diffusion par le cristal, aux électrons d'origine thermique dans le détecteur, etc. En pratique, quand l'efficacité de diffraction est trop faible pour reconstituer les pages de manière fiable, le taux d'erreurs devient inacceptable.

Des signaux plus puissants

Beaucoup de ceux qui étudient les mémoires holographiques ont cherché à augmenter leur capacité de stockage en renforçant les signaux optiques qui représentent des pages de données, par rapport au bruit de fond. Simultanément on apprenait à détecter des signaux de plus en plus faibles, de sorte que l'on parvenait progressivement à graver plus de pages dans les cristaux.

Au début des années 1970, Juan Amodi, William Phillips et David Staebler, des Laboratoires RCA, enregistraient 500 hologrammes d'ondes planes dans un cristal de niobate de lithium dopé au fer. Puis Robert Bartolini et d'autres, toujours aux Laboratoires RCA, enregistrèrent 550 hologrammes d'images à haute résolution dans un cristal de niobate de lithium dopé au fer. Plus récemment, Jean-Pierre Huignard et ses collègues du Laboratoire central de recherches de la Société Thomson-CSF, ont enregistré dans un cristal de niobate de lithium dopé au fer une mémoire comportant 256 sites, chacun pouvant stocker dix hologrammes : de grande capacité, le dispositif de la Thomson était remarquablement conçu.

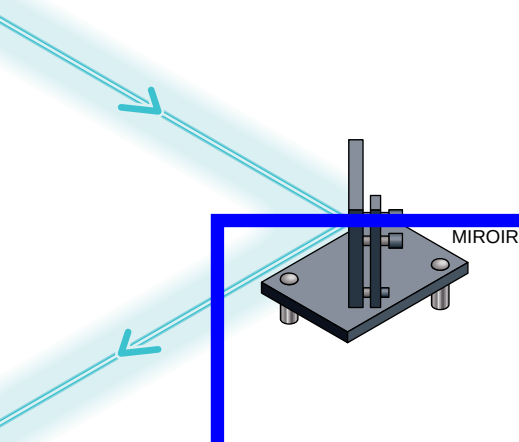
Malgré la virtuosité de ces premiers travaux, aucun n'aboutit à un système pratique. Comme les mémoires à semi-conducteurs et les mémoires magné-

tiques progressèrent alors rapidement, la recherche de techniques plus exotiques semblait superflue, et les mémoires holographiques quittèrent le devant de la scène.

Elles réapparurent en 1991, quand l'un d'eux (F. Mok) stocka avec une bonne fidélité et une haute résolution 500 images holographiques dans un cristal de niobate de lithium contenant des traces de fer. Plusieurs progrès suivirent. En 1992, nous avons enregistré 1 000 pages de données numériques dans un cristal de niobate de lithium dopé au fer d'un volume de un centimètre cube. Chaque page contenait 160×110 bits provenant de la mémoire micro-électronique d'un micro-ordinateur personnel. Puis nous avons récupéré et reconstitué dans la mémoire de l'ordinateur sans erreur, des parties de l'information enregistrée. Cette expérience a montré, pour la première fois, que la précision du stockage holographique est suffisante pour les besoins de l'informatique.

Avec un dispositif analogue, on a ensuite stocké 10 000 pages de 320×220 bits chacune : au total, on mémorisait au moins de 100 millions de « mots » (100 méga-mots). La plupart des 10 000 hologrammes enregistrés étaient des réseaux binaires aléatoires, analogue aux données qui seraient emmagasinées dans un ordinateur classique. La proportion d'erreur, avant correction, était d'un bit sur 100 000, ce qui est suffisant pour le stockage d'images, notamment si les données n'ont pas été comprimées. Dans les pages enregistrées, nous avons placé quelques photographies de visages et d'objets, afin de démontrer qu'une mémoire holographique peut facilement contenir à la fois des images et des données binaires. L'information contenue dans les 10 000 hologrammes n'aurait pu être stockée dans un support compact classique, mais on peut réaliser des mémoires holographiques de capacité supérieure en enregistrant les hologrammes en plusieurs endroits.

En 1994, à l'Université Stanford, John Heanue, Matthew Bashaw et Lambertus Hesselink ont enregistré des images et des données vidéo, numérisées et comprimées, dans une



mémoire holographique, puis ils ont récupéré l'information sans perte appréciable de la qualité de l'image. Quelque 308 pages contenant chacune 1 592 bits de données brutes étaient enregistrés sur quatre sites différents du même cristal. Le groupe de Stanford a utilisé plusieurs techniques, certaines optiques, afin de minimiser la proportion d'erreurs. Par exemple, ils ajoutaient à chaque chaîne de huit bits quelques bits destinés à corriger l'erreur provenant d'un bit quelconque du groupe. Ce protocole de correction a réduit la proportion d'erreurs de un pour 10 000 à environ un par million.

Le stockage holographique a l'avantage important qu'on peut accéder rapidement, sans action mécanique, à n'importe quelle partie de l'information par accès «aléatoire». On sait, par exemple, que les ondes acoustiques de haute fréquence pour dévier le faisceau lumineux de référence, afin de lire une page quelconque de données en quelques dizaines de microsecondes, à comparer aux dizaines de millisecondes nécessaires aux déplacements des têtes de lecture des disques optiques ou magnétiques actuels. Au Centre de

recherche de la Société *Rockwell*, John Hong et la *McMichael* ont créé un système compact qui enregistre jusqu'à 1 000 hologrammes par site, sur 20 sites et qui accède à une page quelconque en moins de 40 microsecondes, restituant les données de cette page sans erreur.

Les polymères de demain

Ces tests récents utilisaient, comme les premières expériences des années 1970, un cristal de niobate de lithium contenant des traces de fer. Lorsqu'un tel cristal est éclairé par un réseau optique – tel l'hologramme produit par l'intersection de deux faisceaux laser –, les particules de fer migrent dans le cristal, engendrant ainsi un champ électrique interne qui correspond au réseau optique. Ce champ électrique module la diffraction

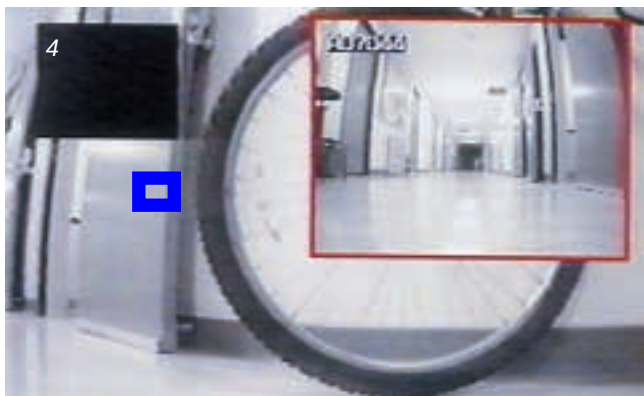
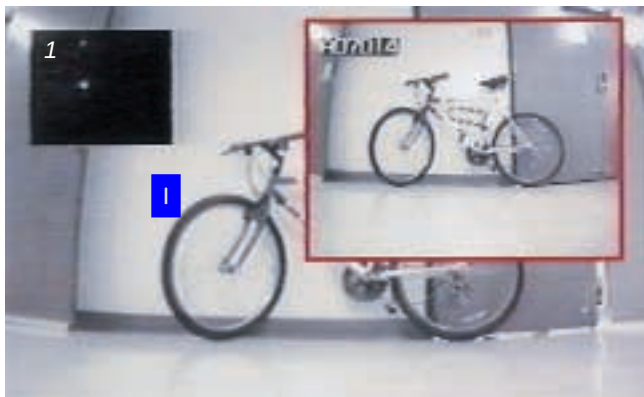
et le cristal est éclairé à nouveau, avec un angle d'incidence approprié, la lumière diffractée reconstitue l'hologramme initial par effet photoréfractif.

Un autre type de matériaux holographiques est commercialisé depuis 1994 par la Société *Du Pont* : un photopolymère subit une transformation chimique, plutôt que photoréfractive,

sous l'action de la lumière. Des changements électriques ne sont pas déplacés, et la transformation photochimique est permanente : l'information ne pouvant être effacée et réécrite, ce matériau ne convient que pour des mémoires «mortes», qu'on lit seulement, mais avec une sensibilité 25 fois supérieure à celle d'un cristal de niobate de lithium de la même épaisseur. Avec Allen Pu et Kevin Curtis, l'un d'entre nous (D. Psaltis) a effectué une expérience où 1 000 pages de bits étaient enregistrées dans un film de polymère de 0,1 millimètre d'épaisseur, puis restituées sans aucune erreur.

Ces dernières années, des ingénieurs de la recherche de la Société *IBM* et de l'Université d'Arizona ont commencé à tester des films de polymères photoréfractifs. Les résultats sont prometteurs, mais il est trop tôt pour abandonner les cristaux de niobate de lithium.

récentement révélé d'une grande souplesse d'emploi. Par exemple, des cristaux de niobate de lithium dopé avec des traces de cérium et de fer – deux éléments sensibles à la lumière rouge plutôt qu'à la lumière verte – sont disponibles depuis peu. Ils préfigurent des cristaux qui pourraient être gravés à l'aide de lasers à semi-conducteurs,



petits et bon marché, plutôt que de lasers verts ou bleu-vert, bien plus chers.

Un emprunt et une nouveauté

Les cristaux de niobate de lithium dopés au cérium, utilisés dans les tests récents ne sont pas la seule survivance des expériences pilotes, qui ont commencé il y a plus de 20 ans : les lasers à argon subsistent également dans la plupart des systèmes, tout comme le multiplexage angulaire. Quels changements, alors, ont-ils ressuscité le stockage holographique de données ?

Tout d'abord, l'industrie opto-électronique a appris à produire des appareils compacts, efficaces et bon marché pour fabriquer en série des mémoires holographiques et pour les relier aux ordinateurs.

Ensuite, les lasers à semi-conducteurs qui ont été initialement mis au point pour les transmissions par fibres optiques peuvent être utilisés comme sources de lumière rouge, activant soit les cristaux de niobate de lithium dopés au cérium et au fer, soit les photopolymères. Les détecteurs de caméras de télévision, conçus à l'origine pour les projecteurs vidéo,

convertissent une image optique en signaux électroniques ; dans les mémoires holographiques, ils lisent les données. Les écrans à cristaux liquides affichent les réseaux qui représentent les pages de données.

Ces progrès techniques ont facilité les récentes mises au point qui, à leur tour, ont motivé de nouvelles recherches sur la physique du stockage holographique de données. Depuis longtemps, on se préoccupait ainsi des phénomènes qui brouillent les données (diaphonie), conduisant à des erreurs de lecture : des images pâles, fantomatiques, de toutes les pages enregistrées se superposent à celle de la page qu'on veut lire. On comprend maintenant mieux ces manifestations, de sorte que l'on sait les contrecarrer en calculant les corrections, à partir de paramètres tels que l'angle entre le fais-

ceau de référence et l'angle entre les faisceaux de référence pour des enregistrements multiplexés, et les caractéristiques géométriques des pages de données.

À partir des études théoriques, on a également perfectionné les méthodes de multiplexage et inventé de nouvelles méthodes qui remplacent ou complètent le multiplexage angulaire. Notam-

ment on peut enregistrer les pages successives à l'aide de faisceaux de référence de longueurs d'onde différentes. On utilise des faisceaux de référence codés avec des grilles différentes pour chaque page, comme l'étudiant Gérald Roosevelt et ses collègues de l'Institut d'optique à Orsay.

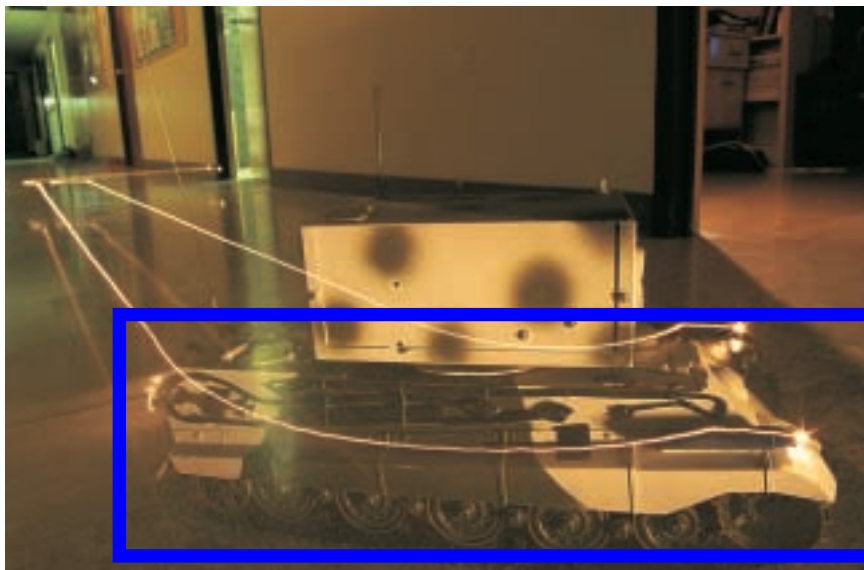
Avec de gros cristaux

Malgré l'effort des chercheurs, les mémoires holographiques ne s'imposeront que si l'on trouve des principes nouveaux pour accroître leur capacité. On a montré que les mémoires holographiques actuelles sont beaucoup plus rapides que les systèmes à disques compacts, mais la vitesse à elle seule n'est pas un atout industriel suffisant.

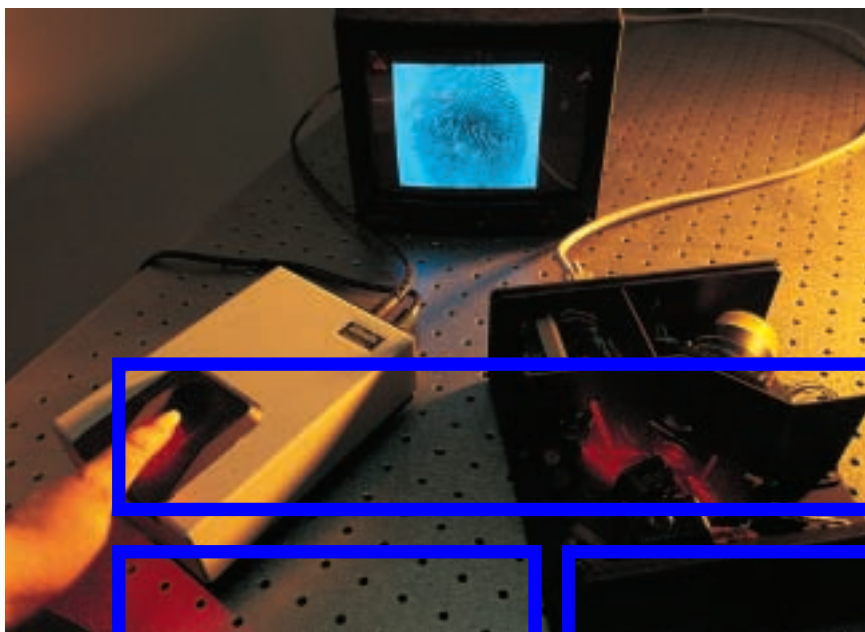
Pour augmenter le volume de stockage d'une mémoire holographique, on doit augmenter sa capacité spatiale, consiste à paver une surface à

deux dimensions avec de petits cristaux cubiques : les données sont enregistrées dans ces cubes par multiplexage angulaire, et la capacité totale du système est proportionnelle au nombre de cubes.

Dans ce type d'appareil, la partie la plus délicate à concevoir est le système optique : les hologrammes doi-



un VÉHICULE GUIDÉ par un système holographique se dirige par ses propres moyens à l'intérieur du bâtiment d'électrotechnique de l'Institut de technologie de Californie. Chacune des photographies de cette série montre l'image vue par une caméra vidéo fixée sur le véhicule (*vue principale*), ainsi qu'une autre image (*cartouche*) provenant d'une mémoire holographique et transmise au petit engin. Pour se diriger, ce dernier (*ci-dessus*) s'oriente jusqu'à ce que l'image vue par sa caméra coïncide avec celle qui provient de la mémoire holographique. Cette coïncidence est signalée par des taches lumineuses dans le cartouche supérieur gauche de chaque image. Sur cette série de photographies, le véhicule reconnaît une bicyclette, puis se guide d'après l'image qu'il devrait voir après un virage à gauche, qu'il trouve après quelques tâtonnements.



4. CETTE SERRURE HOLOGRAPHIQUE mémorise jusqu'à 1 000 empreintes digitales. Pour entrer dans une pièce, un usager pose son doigt sur une plaque de verre. L'accès est autorisé si son empreinte digitale est reconnue comme identique à l'une des empreintes enregistrées sous la forme d'hologrammes. La Société japonaise *Hamamatsu* met aujourd'hui au point un dispositif de ce genre. Il emploie la mémoire holographique montrée ici qui est fabriquée par la Société *Holoplex*.

vent pouvoir être dirigés à la demande sur un cube quelconque. Dans les disques tridimensionnels, testés depuis 1992, le fonctionnement ressemble à celui des disques compacts classiques, car le support d'enregistrement, en forme de disque, est placé sur un plateau en rotation : un dispositif d'écriture et de lecture à laser, la «tête», est fixé au-dessus du disque. Par rotation du disque et par balayage radial de la tête, on parcourt n'importe quel point du disque. Comme pour tout support holographique, les données sont enregistrées dans tout le volume de la couche d'enregistrement du disque. La tête de lecture comporte un ensemble de miroirs qui permettent de lire toute une page de données, ainsi qu'un système de déviation du faisceau, qui assure le multiplexage angulaire. On peut aussi incorporer à la tête un modulateur spatial de lumière (par exemple, l'écran à cristaux liquides utilisé dans les tests en cours), qui imprime les données sur le faisceau signal.

Bien que ces disques tridimensionnels emmagasinent l'information en trois dimensions, ils sont si minces qu'il n'est pas déplacé de calculer le nombre de bits qui peuvent, en théorie, être enregistrés par micromètre carré de la surface du disque et de comparer cette densité de surface à

celle d'un disque compact. Pour des épaisseurs inférieures à deux millimètres, la densité de surface du disque holographique est approximativement proportionnelle à l'épaisseur du support d'enregistrement. À l'Institut de technologie de Californie, A. Pu a obtenu une densité de dix bits par micromètre carré, pour un disque constitué d'un film polymère de 100 micromètres d'épaisseur (l'épaisseur maximale pour ce genre de matériau). Cette densité est environ dix fois supérieure à celle d'un disque compact classique.

On peut augmenter la densité de surface en augmentant l'épaisseur de la couche holographique. Un matériau de un millimètre d'épaisseur permettrait de stocker 100 bits par micromètre carré : le disque tridimensionnel correspondant aurait la taille et le poids d'un disque compact classique, mais contiendrait 100 fois plus d'informations.

La société *Holoplex*, basée à Pasadena, a fabriqué un système de mémoire à grande vitesse qui pourrait emmagasiner jusqu'à 1 000 empreintes digitales, afin d'équiper des serrures sélectives pour des bâtiments à accès protégé. Bien que sa capacité soit deux fois inférieure à celle d'un disque compact, il lit tout son contenu en une seconde. La Société *Holoplex* met

aujourd'hui au point un autre produit qui stockera jusqu'à 1 000 milliards de bits, soit environ 200 fois ce que peut contenir un disque compact.

Mémoires associatives

En attendant l'avènement commercial de ces «superdisques», les technologies holographiques peuvent être utilisées dans des systèmes spécialisés ultrarapides. Certains d'entre eux pourraient exploiter le caractère associatif du stockage holographique, une propriété décrite pour la première fois en 1969 par Denis Gabor, qui obtint en 1971 le prix Nobel de physique pour son invention de l'hologramme.

À partir d'un hologramme et de l'un des deux faisceaux qui l'a produit, on peut reconstituer l'autre faisceau. Autrement dit, on peut envoyer sur le cristal qui stocke un hologramme une page de données particulière afin de récupérer le faisceau de référence, reproduit sous la forme d'une onde plane renvoyée par le cristal. Une lentille peut focaliser cette onde en une petite tache dont la position latérale, déterminée par la direction de l'onde, révèle l'identité de l'image d'entrée. Si la page de données, qui est envoyée sur le cristal ne correspond pas à l'un des hologrammes enregistrés, on obtient plusieurs taches floues. L'intensité de chaque tache est proportionnelle au degré de ressemblance entre l'image d'entrée et chacune des images enregistrées. Autrement dit, l'ensemble des taches constitue une représentation de l'image d'entrée codée en fonction de sa ressemblance avec la base de données des images en mémoire.

Au début de 1995, A. Pu, Robert Denkevater et D. Psaltis ont utilisé une mémoire holographique de ce genre pour piloter un petit véhicule dans le bâtiment d'électrotechnique de l'Institut de technologie de Californie. Des images des couloirs et des salles, préalablement enregistrées sur des disques holographiques,

reliée à un ordinateur numérique, sur un banc de laboratoire, étaient transmises au véhicule par liaison radio. Le véhicule, inversement, transmettait l'image de son environnement par une caméra de télévision émettant par radio. L'ordinateur comparait les images transmises par la caméra à celles qui étaient contenues dans la

mémoire. Lorsque l'engin avait repéré un décor familier, il guidait le véhicule le long d'un des itinéraires définis à l'avance par une série d'images enregistrées en mémoire. Un millier d'images avaient été mémorisées, mais l'expérience a montré que 53 images suffisaient pour piloter le véhicule à travers plusieurs pièces du bâtiment.

Nous construisons aujourd'hui un autre véhicule, que nous espérons équiper d'une mémoire suffisamment grande pour lui permettre de se déplacer de façon autonome n'importe où sur le campus. Même avec une mémoire de cette taille, le fonctionnement en parallèle de la mémoire holographique devrait permettre de rappeler les informations enregistrées assez vite pour que le véhicule suive les rues et évite les obstacles.

Un autre domaine où l'optique est probablement l'une des applications spécialisées dont le succès permettra de généraliser l'utilisation de cette technique. À mesure que le besoin d'enregistrer de grandes quantités d'informations augmentera, l'intérêt de les emmagasiner dans trois dimensions plutôt que dans deux ne pourra que croître.

Demetri PSALTIS est professeur d'électricité à l'Institut de technologie de Californie. Fai MOK est président de la Société *Poloplex*.

David M. PEPPER, Jack FEINBERG et Nicolai V. KUKHTAREV, *L'effet photoréfractif*, *Pour la Science*, n° 158, décembre 1990.

Demetri PSALTIS, *Parallel Optical Memories*, in *Byte*, vol. 17, n° 9, pp. 179-182, septembre 1992.

Fai H. MOK, *Angle-Multiplexed Storage of 500 Holograms in Lithium Niobate*, in *Optics Letters*, vol. 18, n° 11, pp. 915-917, juin 1993.

Hsin-Yu Sidney LI et Demetri PSALTIS, *Three Dimensional Holographic Disks*, in *Applied Optics*, vol. 33, n° 17, pp. 3764-3774, 10 juin 1994.

Selected Papers on Holographic Storage, sous la direction de Glenn T. Sincerbox, SPIE Milestone Series, vol. MS 95, SPIE Optical Engineering Press, 1994.

John H. HONG, Ian MCMICHAEL, Talis Y. CHANG, William CHRISTIAN et Eung Gi PAEK, *Volume Holographic Memory Systems: Techniques and Architectures*, in *Optical Engineering*, vol. 34, n° 8, pp. 2193-2203, août 1995.

La loi des gènes

RICHARD DAWKINS

Pourquoi la vie ? Parce qu'elle assure la survie des gènes.

Dans ses nombreux ouvrages sur l'évolution et la sélection naturelle, Richard Dawkins examine la biologie du «point de vue du gène» : les gènes des êtres vivants seraient égoïstes : ils assureraient leur propre survie en permettant à leurs hôtes – les «machines à survie», comme les nomme R. Dawkins – de vivre assez longtemps pour se reproduire. La complexité de la vie résulterait du combat âpre des gènes pour leur survie ; elle n'aurait aucune finalité cosmique. R. Dawkins explique tel comment la lutte des gènes pour se répliquer pourrait être la clé de quelques-uns des mystères de la vie, tels que : «Comment la vie est-elle apparue?» ou «Pourquoi existons-nous?»

Charles Darwin ne pouvait «imaginer qu'un Dieu bienfaisant et tout-puissant aurait volontairement créé les Ichneumonidés, avec le dessein arrêté d'assurer leur subsistance en parasitant l'intérieur du corps vivant des chenilles». On retrouve ce comportement macabre des Ichneumonidés chez d'autres guêpes,

notamment chez les guêpes fousseuses étudiées par le naturaliste français Jean Henri Fabre. Ce dernier rapporte qu'avant de déposer son œuf dans une chenille, la guêpe fousseuse femelle prend soin d'introduire son aiguillon dans chaque ganglion du système nerveux central de sa proie, afin de paralyser l'animal sans

le tuer : ainsi la viande reste fraîche pour les larves à venir. On ignore si la guêpe anesthésie ainsi la chenille ou si son venin, tel du curare, sert seulement à immobiliser la victime. Dans ce dernier cas, la proie peut avoir conscience d'être dévorée vivante de l'intérieur, mais ne peut bouger le moindre muscle pour s'y opposer. Cela paraît d'une cruauté barbare, mais nous verrons que la Nature n'est pas cruelle : elle est simplement d'une indifférence sans pitié. Cette leçon est l'une des plus terribles qui soit pour l'Homme. Nous ne pouvons accepter que la Nature ne soit ni bonne ni mauvaise, qu'elle ne soit ni cruelle, ni bienveillante, mais simplement inaccessible à la pitié : indifférente à toute souffrance et sans but.



Notre espèce est toujours en quête de la finalité. Il nous est difficile d'observer quelque chose sans en chercher l'utilité, sans nous demander quelle en est la cause ou la finalité. Le désir de trouver une explication à toute chose paraît naturel chez un animal qui vit entouré de machines, d'œuvres d'art, d'outils ou d'autres objets fabriqués, mais chez qui les pensées dominantes sont consciemment tournées vers ses propres buts et projets.

Bien que les voitures, les œuvres d'art, les machines, les boîtes ou les tournevis aient manifestement une fonction, la recherche d'une utilité ou d'une finalité n'est pas toujours légitime ni sensée. Pour des objets, on peut demander : «Quelle est sa température?» ou «Quelle est sa

couleur?» mais cela n'a pas de sens de s'interroger sur la température ou la couleur de la jalousie ou de la prière. De même, on peut se demander à quoi servent les garde-boue d'une bicyclette ou le barrage de Kariba, mais la question de l'utilité ne s'impose pas dans le cas d'un galet, de l'adversité, du mont Everest ou de l'Univers. Aussi inégalement que ces questions puissent avoir été formulées, elles sont hors de propos.

Contrairement aux roches, les organismes vivants et leurs organes sont des objets qui paraissent «prédestinés». De nombreux théologiens, de Thomas d'Aquin à William Paley, ont supposé que le vivant a une finalité. Paley, théologien anglais du XVIII^e siècle, soutenait que, si un objet simple

1. LES «MACHINES À SURVIE» que sont les créatures vivantes servent à propager l'ADN. Le guépard est un bon exemple d'une telle machine.

comme une montre ne pouvait être réalisé que par un horloger, à plus forte raison les créatures vivantes, bien plus complexes, ne pouvaient que résulter d'une conception divine. Les créationnistes modernes ont conservé cette thèse du Grand Horloger sous une forme plus actuelle.

Le mécanisme qui a engendré les ailes, les yeux, les becs, les instincts de nidation et tout ce qui touche à la vie en donnant l'impression qu'ils ont été créés dans un dessein déterminé est aujourd'hui bien connu : c'est la sélection naturelle, exposée par Dar-

win. Darwin a imaginé que les organismes vivant aujourd'hui n'existent que parce que leurs ancêtres possédaient des caractères qui ont favorisé leur survie et celle de leur progéniture ; les individus moins bien adaptés mouraient en laissant moins de descendants, voire aucun. Aussi surprenant que cela paraisse, notre compréhension de l'évolution ne date que d'un siècle et demi. Avant Darwin, même les personnes cultivées qui avaient cessé de s'interroger sur le pourquoi des roches, des fleurs ou des éclipses trouvaient encore légitime de poser cette question au sujet des créatures vivantes. Aujourd'hui, seuls ceux qui ignorent la science en sont encore là... mais ces «seules» personnes sont la majorité de la population mondiale.

La construction d'un guépard

Darwin supposait que la sélection naturelle favorise la survie et la reproduction des individus les mieux adaptés. Autrement dit, elle favorise les gènes qui se reproduisent et se transmettent à de nombreuses générations. Bien que

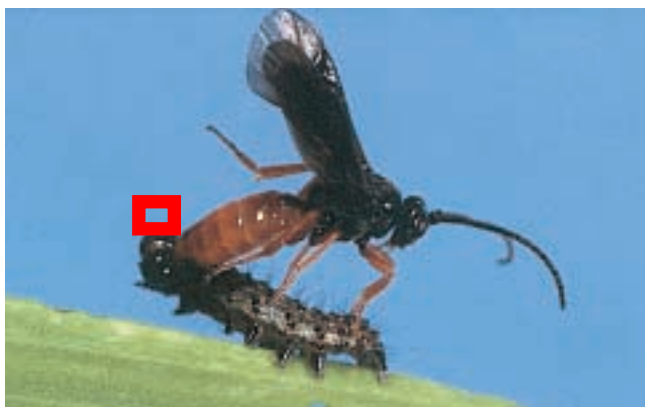
ces deux formulations soient équivalentes, le «point de vue du gène» a plusieurs avantages que l'on perçoit clairement si l'on considère deux concepts techniques : l'ingénierie inverse et la fonction d'utilité.

L'ingénierie inverse est la technique intellectuelle suivante : vous êtes ingénieur, et vous avez devant vous un objet que vous ne connaissez pas. Vous supposez alors que cet objet a été conçu pour exercer une fonction quelconque, et vous le démontez et l'analysez pour tenter de comprendre le problème qu'il est censé résoudre. Vous vous posez alors des questions telles que : «Si j'avais voulu fabriquer une machine ayant telle fonction, aurais-je réalisé cet objet précis?» ou bien : «Cet objet pourrait-il être une machine qui a telle fonction?»

La règle à calcul, sceptre des ingénieurs en activité avant les années 1950, est aujourd'hui un objet tout aussi désuet qu'un vestige de l'Âge du bronze. Un archéologue des siècles à venir qui trouverait une règle à calcul et chercherait sa fonction pourrait d'abord remarquer qu'elle permet de tracer des lignes droites ou de beur-

coulisser des centraux sont inutiles dans les règles ou dans les couteaux à beurre. En outre, les graduations logarithmiques sont disposées trop méticuleusement pour être le fruit du hasard. Il viendrait alors à l'esprit de cet archéologue du futur qu'à un âge précédent celui des calculateurs électroniques cet objet mettait en œuvre un procédé ingénieux pour effectuer rapidement des multiplications et des divisions. Le mystère de la règle à calcul serait ainsi résolu par l'ingénierie inverse, dans l'hypothèse que cet objet possède une conception intelligente et économique.

La notion d'utilité, d'autre part, est un concept technique d'économistes : un individu maximise sa fonction d'utilité, laquelle représente sa satisfaction. Les économistes et les sociologues sont comparables aux architectes et aux physiciens, en ce qu'ils cherchent eux aussi à optimiser un facteur. Les utilitaristes s'efforcent de tendre vers «le plus grand bonheur pour le plus grand nombre». D'autres, égoïstement, cherchent à accroître leur propre bonheur au détriment du bien-être général. Si vous soumettez l'attitude de tel ou tel gou-



vernement à une analyse par ingénierie inverse, vous conclurez parfois qu'il cherche à optimiser l'emploi et le bien-être national ; pour un autre pays, la fonction d'utilité sera, par exemple, la durée du mandat présidentiel, la richesse d'une famille gouvernementale, la stabilité au Moyen-Orient ou, encore, le maintien des prix du pétrole. On peut imaginer des fonctions d'utilité variées : on comprend parfois difficilement ce que visent les individus, les entreprises ou les gouvernements.

Dans le cas des êtres vivants, de nombreuses fonctions d'utilité sont envisageables, mais nous verrons qu'elles se réduisent toutes à une seule. Imaginons que les êtres vivants ont été créés par un ingénieur divin et essayons de découvrir, par ingénierie inverse, ce que cet ingénieur a tenté d'optimiser : quelle est la fonction d'utilité de Dieu ?

Les guépards sont un exemple parfait de créatures qui semblent conçues pour un but précis, de sorte que nous devrions facilement découvrir, par ingénierie inverse, leur fonction d'utilité. Tout en eux semble étudié pour tuer des gazelles : les dents, les griffes,

les yeux, le museau, les muscles des pattes, la colonne vertébrale, le cerveau semblent être exactement comme si Dieu, en créant les guépards, avait voulu leur permettre de tuer le plus grand nombre de gazelles. D'autre part, l'ingénierie inverse appliquée aux gazelles révèle de façon tout aussi convaincante qu'elles sont créées pour survivre et faire jeûner les guépards. On pourrait croire que les guépards et les gazelles ont été conçus par deux divinités concurrentes. Car si l'on ne doit qu'à un seul Créateur le tigre et l'agneau, le guépard et la gazelle, à quoi jouent-ils ? Est-il un sadique qui se réjouit de jeux sanglants ? Tente-t-il d'éviter la surpopulation des mammifères en Afrique ? Ce sont là des fonctions d'utilité toutes aussi semblables... mais toutes fausses.

La véritable fonction d'utilité de la vie, ce vers quoi tout tend dans la Nature, c'est la survie de l'ADN. Or, celui-ci n'est pas libre : enfermé dans des organismes vivants, il doit employer les moyens d'action qui sont à sa disposition. Les séquences génétiques présentes dans le corps des guépards maximisent leur chance de survie en poussant les guépards à tuer les

gazelles. Les gènes présents dans le corps des gazelles accroissent leur chance de survie en poussant leur « machine à survie » vers un but opposé. La même fonction d'utilité – la survie de l'ADN – explique simultanément la « finalité » du guépard et celle de la gazelle.

Ce principe explique toute une série de phénomènes qui, autrement, seraient déconcertants. Notamment les espèces animales variées se livrent des combats épuisants et souvent risibles pour attirer les femelles ; leurs investissements en « beauté » semblent également inutilement pesants. Ces rituels d'accomplissement font souvent penser aux concours de beauté, mais pour les mâles. Les lieux de parades d'oiseaux tels que le coq de bruyère ressemblent aux podiums où l'on élit Miss Monde : ce sont de petits terrains qu'utilisent les oiseaux mâles pour venir se pavaner devant les femelles. Celles-ci viennent observer les démonstrations fanfaronnes d'un certain nombre de mâles avant d'en choisir un et de s'accoupler avec lui. Les mâles des espèces pratiquant cette parade sont souvent dotés d'une ornementation bizarre qu'ils affichent tout



2. LA DIVERSITÉ DU VIVANT est un signe de l'inventivité de l'ADN, qui met en œuvre des techniques originales pour maximiser ses chances de survie. Par exemple, les muscles d'une patte de guépard permettent à celui-ci de poursuivre les gazelles ; de leur côté, les gazelles sont, malgré tout, bien équipées pour échapper aux guépards. Dans ce combat à mort, les deux animaux font tout pour tenter d'assurer leur survie. Les guêpes parasites maximisent les chances de survie de leur ADN en devenant les prédateurs de chenilles : une guêpe femelle dépose un œuf dans une chenille probablement paralysée à l'aide de son aiguillon et, après éclosion, la larve mange la chenille vivante. Les caractéristiques physiques utilisées dans le cadre des rituels d'accouplement sont aussi spécialisées que celles utilisées pour la chasse. Beaucoup d'oiseaux, tel le faisan de l'Himalaya, et certains poissons comme le Diagramme oriental affichent des couleurs vives afin d'attirer les partenaires et d'assurer la reproduction de leur ADN. Les plantes, également, entrent en compétition les unes avec les autres afin de se ménager de meilleures occasions de se reproduire : les forêts tropicales humides s'étirent vers le ciel parce que chaque arbre cherche à obtenir plus de lumière que ses congénères, ce qui lui permettra de se propager.

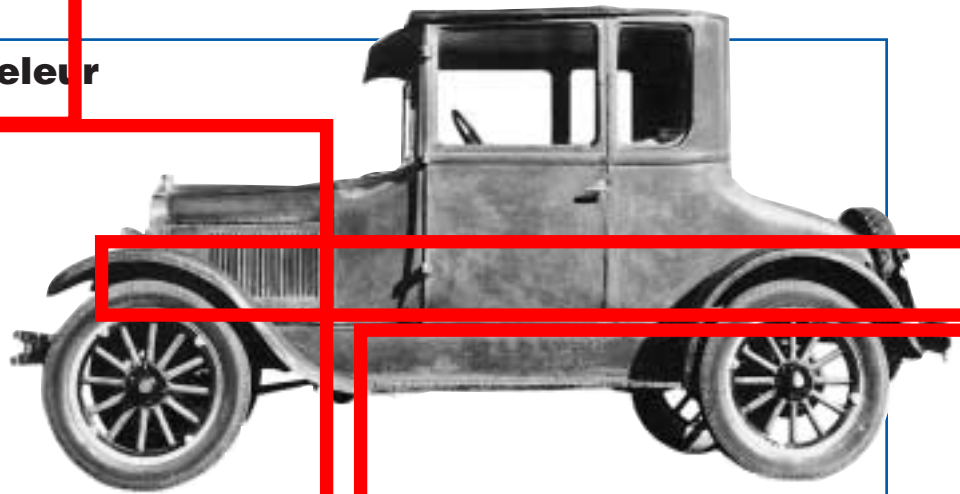
Le Grand Niveleur

Les organismes multicellulaires peuvent maximiser la survie de leur ADN en dépensant peu d'énergie pour s'assurer de la survie prolongée de leurs organes. Les constructeurs d'automobiles agissent de même. Nicholas Humphrey, de l'Université de Cambridge, raconte qu'Henry Ford, le saint patron du rendement industriel,

«charge un jour une équipe d'explorer les dépôts de pièces usagées de voitures dans toute l'Amérique pour vérifier s'il n'existait pas des pièces du *Ford Modèle T* qui n'auraient jamais montré de défaut. Ses inspecteurs reviennent avec des rapports sur presque toutes les sortes de pannes concernant des axes, des freins, des pistons, etc. : toutes ces pièces étaient responsables de quelques défauts de fonctionnement. À une remarquable exception près, signalée tout particulièrement dans ces rapports et qui concernait les chevilles maîtresses : dans les voitures usagées, toutes ces pièces auraient eu bien des années supplémentaires de bon fonctionnement. Avec une logique impitoyable, Ford déduisit que ces pièces-là, sur le *Modèle T*, étaient de trop bonne qualité pour l'usage qu'on leur demandait et exigea qu'à l'avenir elles soient fabriquées avec des spécifications moins rigoureuses.»

Sans doute n'avez-vous, comme moi, qu'une idée assez vague du rôle technique des chevilles maîtresses, mais là n'est pas la question. Elles sont l'une des pièces nécessaires au fonctionnement des voitures, et la réaction apparemment impitoyable de Ford était, en fait, on ne peut plus logique. L'autre solution possible était d'améliorer toutes les autres pièces de la voiture pour les amener aux normes de qualité des chevilles maîtresses. Dans ce cas, la voiture construite par Ford n'aurait plus été un *Modèle T*, mais une *Rolls-Royce*, ce qui n'était pas le but de l'opération. Il est tout à fait respectable de construire une voiture telle qu'une *Rolls-Royce*, et il en est de même pour un *Modèle T*, mais à un prix différent. L'astuce consiste à être certain que toute la voiture est construite aux normes de qualité d'une *Rolls-Royce* ou au contraire à celles d'un *Modèle T*. La pire solution est la réalisation d'une voiture hybride, dont certaines pièces ont la qualité du *Modèle T* et d'autres celle requise pour une *Rolls-Royce*, car la voiture deviendra hors d'usage lorsque la plus vulnérable de ses pièces sera défaillante, et l'argent dépensé pour la fabrication des pièces de haute qualité qui n'ont jamais le temps de s'user est un gâchis.

La leçon ainsi donnée par Ford est applicable avec encore plus de pertinence aux corps vivants qu'aux voitures, car, dans celles-ci, les différents éléments peuvent, dans certaines limites, être remplacés par des pièces détachées. Les singes et les gibbons, qui passent leur vie dans les hauteurs des arbres, courent en permanence le risque de tom-

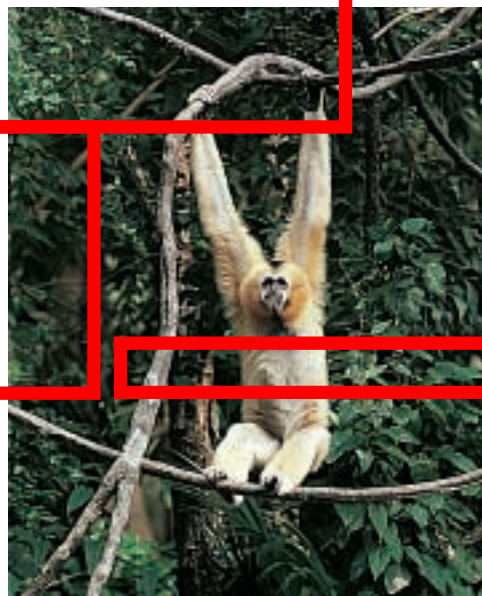


LA FORD MODÈLE T, tout comme les autres vivants, n'était pas destinée à durer éternellement. C'est pourquoi il aurait été ridicule de gaspiller de l'argent en l'équipant de pièces indus-

ber et de se rompre les os. Supposons alors que nous ayons chargé une équipe d'examiner le corps des gibbons et d'évaluer la fréquence de rupture de chacun des os principaux. S'il apparaissait, par exemple, que chaque os s'est brisé une fois ou l'autre, sauf le péroné (ce petit os qui est situé parallèlement au tibia), par exemple, qui jamais ne se serait cassé chez aucun gibbon, la consigne d'un Henry Ford aurait alors été, sans hésitation, de faire redessiner ce péroné avec une norme de qualité inférieure. C'est ce que réalise la sélection naturelle : des individus mutants, avec un péroné de qualité inférieure et des caractéristiques de croissance telles que le précieux calcium est moins fourni à cet os, pourraient utiliser le matériau ainsi économisé pour épaissir d'autres os de leur corps et atteindre alors la constitution idéale où aucun os n'a plus de chance qu'un autre de se rompre. Ou bien ces individus pourraient utiliser le calcium ainsi économisé pour produire davantage de lait et élever davantage de jeunes. Un os peut en toute sûreté prélever une certaine couche du péroné, au moins jusqu'au point où ce dernier présente une chance de rupture à peu près égale à celle de celui des autres os qui a la plus grande durée de vie. L'autre solution – la «solution de la *Rolls-Royce*», qui consisterait

à porter tous les autres organes aux normes de qualité du péroné – est beaucoup plus difficile à mettre en œuvre.

La sélection naturelle nivelle ainsi la qualité aussi bien vers le haut que vers le bas, jusqu'à ce qu'un équilibre satisfaisant soit obtenu entre toutes les parties du corps. Vus sous l'angle de la sélection naturelle, le vieillissement et la mort sont les conséquences peu réjouissantes de cette recherche d'équilibre. Nous sommes les héritiers d'une longue lignée d'ancêtres jeunes, dont les gènes assurent la vitalité au cours des années de reproduction, mais pas la moindre provision de vigueur pour les années suivantes. Jeunesse et santé sont indispensables pour assurer la transmission et la survie de l'ADN. En revanche, vivre un quatrième âge en pleine forme n'est sans doute qu'un luxe, qui rappelle tout à fait les chevilles maîtresses de qualité supérieure du *Modèle T*.



LE GIBBON ne vit pas éternellement, et ses pièces détachées sont beaucoup plus difficiles à trouver.

en effectuant de remarquables saluts, révérences et bruits étranges. Les termes « bizarre », « remarquable », « étrange » sont des jugements de valeur tout à fait subjectifs : le coq de bruyère mâle, qui se livre à des danses pompeuses, en faisant des bruits de bouillon qui saute, ne paraît probablement pas étrange aux femelles de sa propre espèce, et c'est là l'essentiel. Dans certains cas, les canons de beauté des oiseaux femelles coïncident avec les nôtres : cela donne le paon ou l'oiseau de paradis.

La fonction de beauté

Le chant du rossignol, la queue des faisans, les nuances arc-en-ciel des poissons des récifs tropicaux sont des solutions du problème de maximisation de la fonction d'utilité qu'est la beauté, mais cette beauté n'est pas destinée – sauf par accident – à réjouir les Hommes. Si le spectacle de la nature vous plaît, c'est accessoire. Les gènes des mâles qui séduisent les femelles sont transmis aux générations suivantes. Une seule fonction d'utilité peut rendre compte de tant de beautés : cette grandeur dont chaque manifestation du monde vivant recherche l'optimisation, c'est toujours la survie de l'ADN ; c'est elle qui est responsable de toutes les caractéristiques que vous essayez d'expliquer.

Cette fonction rend également compte de l'excès mystérieux. Les paons, par exemple, sont alourdis d'une parure si encombrante qu'elle pourrait les empêcher de travailler, pour peu qu'ils en soient tentés, ce qui, en fait, n'est pas le cas. Les oiseaux chanteurs mâles dépensent des quantités impressionnantes de temps et d'énergie à chanter : non seulement leurs chants attirent les prédateurs, mais cette activité leur fait perdre de l'énergie et du temps, qui pourraient être utilisés à reconstituer cette énergie. Un étudiant en biologie, spécialiste des roitelets, racontait qu'un de ses oiseaux mâles avait chanté jusqu'à en mourir. N'importe quelle fonction d'utilité qui viserait la prospérité durable de l'espèce, ou même la survie individuelle d'un mâle particulier, mettrait un frein, à tant de chants, à tant de parades, à tant de luttes.

On explique facilement ces comportements lorsque l'on considère la

sélection naturelle du point de vue des gènes et non plus uniquement dans l'optique de la survie et de la reproduction des individus. La survie de l'ADN étant la fonction d'utilité du roi let qui chante, rien ne peut arrêter la transmission d'un ADN qui n'a d'autre effet bénéfique que de rendre les mâles beaux aux yeux des femelles. Si quelques gènes donnent aux mâles des qualités que les femelles de leur espèce trouvent à leur goût, ces gènes survivront bon gré mal gré, même s'ils mettent en péril certains individus.

Notre espèce tend à supposer que la « prospérité » doit être celle du groupe, et que le « bien-être » est nécessairement celui de toute la société, l'avenir heureux de l'espèce ou la santé des écosystèmes. Avec de telles visions utopiques, la fonction d'utilité de Dieu, telle qu'on peut la concevoir à partir d'une contemplation des mécanismes de la sélection naturelle, risque de devenir contestable. Il existe bien des occasions où des gènes tendent vers leur prospérité personnelle en programmant une coopération désintéressée entre organismes ou même l'autodestruction de l'organisme qui les abrite. La prospérité du groupe n'est, elle, jamais une orientation majeure : c'est toujours une conséquence fortuite.

Cette hypothèse de l'égoïsme des gènes explique également des excès du règne végétal. Pourquoi les arbres des forêts sont-ils si grands ? Parce qu'ils visent à dépasser les arbres rivaux. Une fonction d'utilité « judicieuse » aurait conduit à ce que les arbres soient tous courts : ils bénéficieraient ainsi chacun de la même quantité de lumière solaire, avec une dépense énergétique bien moindre. Si ces arbres étaient tous courts, la sélection naturelle ne pourrait faire autrement que de favoriser celui qui s'est trouvé avoir poussé un peu plus haut que les autres. La hauteur courante se trouvant ainsi relevée, d'autres arbres se mettent à en faire autant, si bien que rien n'arrête la course à la hauteur et que les arbres sont exagérément grands. Toutefois, cet effort ne paraît exagéré et ridicule que si l'on juge avec des critères d'économie et de rationalité, en ne pensant qu'à une efficacité maximale plutôt qu'à la survie de l'ADN.

De tels effets se retrouvent dans les sociétés humaines. Dans une récep-

tion, par exemple, chacun s'égosille pour se faire entendre de son interlocuteur. Mais si tous se mettaient d'accord pour chuchoter, ils s'entendraient tout aussi bien, en fatiguant moins leur voix. Malheureusement, ce genre d'accords ne s'obtient que sous la contrainte. Il y a toujours quelqu'un pour rompre égoïstement l'accord en parlant un peu plus fort, si bien que les uns puis les autres finissent par en faire autant. Un équilibre stable n'est atteint que lorsque chacun crie au maximum de ses possibilités, c'est-à-dire beaucoup plus fort qu'il n'est nécessaire d'un point de vue rationnel. Une fois de plus, une coopération avec une certaine dose de contrainte est compromise par son instabilité intrinsèque. La fonction d'utilité de Dieu est rarement le plus grand bien possible pour le plus grand nombre d'individus. Au contraire, elle trahit ses origines et se présente plutôt comme une bousculade désordonnée pour un profit personnel.

Un univers d'indifférence

Revenons à notre pessimisme initial : l'optimisation de la survie de l'ADN n'est pas une recette du bonheur. Du moment que l'ADN est transmis, il lui importe peu que sa transmission se fasse au détriment de quelqu'un ou de quelque chose. Les gènes ne se préoccupent pas de la souffrance, parce qu'ils ne se préoccupent de rien.

Pour les gènes de la guêpe fouis-seuse, il est préférable que la chenille soit vivante et fraîche, quand elle est dévorée, quelle que soit sa souffrance. Si la Nature était bienveillante, elle aurait au moins une concession mineure en prévoyant d'anesthésier les chenilles avant qu'elles ne soient dévorées vivantes de l'intérieur. La Nature n'est ni bienveillante ni malveillante : elle n'est ni un adversaire ni un partisan de la souffrance. La Nature ne s'intéresse pas à une souffrance plus qu'à une autre, sauf si elle a des conséquences sur la survie de l'ADN. On pourrait imaginer, par exemple, l'existence d'un gène qui calmerait les gazelles lorsqu'elles sont en train de souffrir d'une morsure mortelle. La sélection naturelle favoriserait-elle ce gène ? Sans doute pas, à moins que le fait de tranquilliser ainsi une gazelle n'augmente les chances de transmission de ce gène aux générations suivantes. Comme il est diffi-

lement imaginable qu'il en soit ainsi, nous devons supposer que les gazelles vivent en peur et des souffrances terribles lorsqu'elles sont poursuivies à mort, ce qui est le lot de beaucoup d'autres êtres.

La quantité totale de souffrance qui est vécue chaque année dans le monde naturel déborde toute observation placide : pendant la seule minute où j'écris cette phrase, des milliers d'animaux sont mangés vivants ; d'autres gémissant de peur, luttent pour sauver leur vie ; d'autres sont lentement dévorés de l'intérieur par des parasites hostiles ; d'autres, encore, de toutes espèces, par maladie, meurent de faim, de soif ou de quelque maladie. Et il doit en être ainsi. Si jamais une période d'abondance survenait, les populations augmenteraient jusqu'à ce que l'état normal de famine et de misère soit à nouveau atteint.

Dans un univers peuplé d'électrons et de gènes égoïstes, de forces physiques aveugles et de gènes qui se répliquent, les personnes sont meurtries, d'autres ont de la chance, sans rime ni raison, sans qu'on puisse y déceler la moindre justice. L'univers que nous observons a très exactement les caractéristiques qu'on peut s'attendre à lui trouver : si aucune idée n'a présidé à sa conception, aucun objectif, aucun mal et aucun bien, rien d'autre qu'une indifférence sans compassion. Comme l'écrivait ce poète malheureux que fut A. E. Housman :

La Nature, qui est sans cœur et sans esprit,
Ne veut ni se soucier ni connaître.

L'ADN, lui non plus, n'est capable ni de sentiments ni de connaissance. Il existe, c'est tout. Et c'est lui qui nous impose sa loi.

Richard DAWKINS est professeur de zoologie à l'Université d'Oxford.

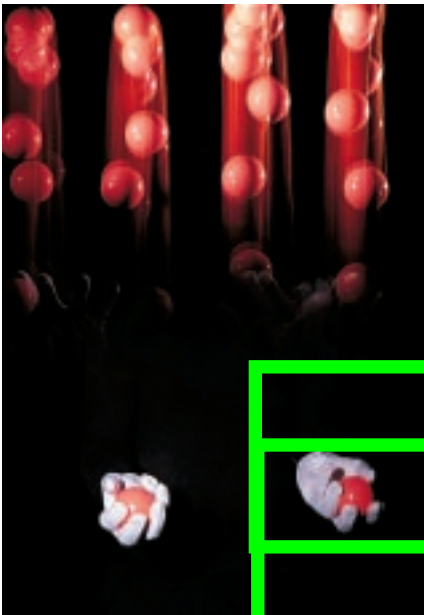
Richard DAWKINS, *Le gène égoïste*, Éditions Armand Colin, 1990.

Richard DAWKINS, *L'horloger aveugle*, Éditions Robert Laffont, 1989.

Richard DAWKINS, *The Extended Phenotype : The Long Reach of the Gene*, Oxford University Press, 1982.

Mark RIDLEY, *Evolution*, Blackwell Scientific Publications, 1993.

Daniel DENNETT, *Darwin's Dangerous Idea : Evolution and the Meanings of Life*, Simon & Schuster, 1995.



La science de la jonglerie

PETER DEE & ARTHUR LEWBEL

Comment les jongleurs parviennent-ils à lancer et à rattraper balles et anneaux avec tant d'adresse? L'étude de leur activité est utile en psychomotricité, en robotique et en mathématiques.

Pour livrer des munitions, un homme de 74 kilogrammes qui transporte trois boulets de canon de 500 grammes doit traverser un pont branlant qui ne supporte que 75 kilogrammes. S'il est pressé et s'il ne peut effectuer qu'un seul voyage, comment doit-il faire? La solution de cette vieille devinette est que l'homme doit jongler avec les boulets de canon en traversant le pont. En fait, cette solution est mauvaise, car, pour lancer un boulet en l'air le jongleur doit exercer une force qui s'ajoute à son poids et devient supérieure à la résistance du pont. L'homme finirait au fond du précipice.

Bien qu'elle ne soit pas utile pour la traversée des ponts, la jonglerie est suffisamment complexe pour présenter des propriétés intéressantes et suffisamment simple pour permettre la modélisation de ces propriétés. Trois disciplines s'y intéressent. Les spécia-

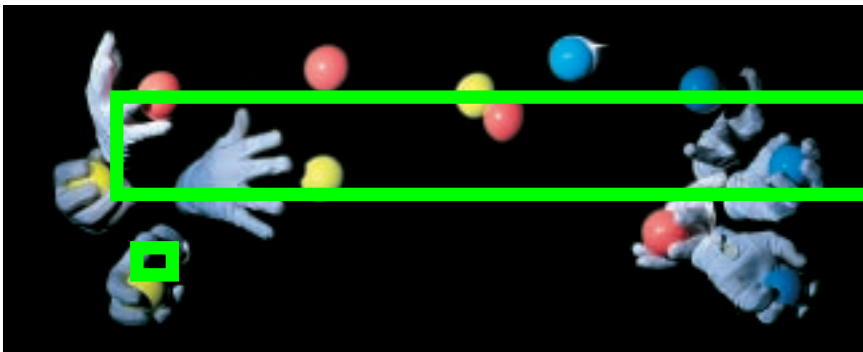
listes de la psychomotricité, tout d'abord, l'étudient afin de mieux comprendre les mouvements humains et la coordination des membres. Les spécialistes de robotique, d'autre part, construisent des machines à jongler afin de développer et tester des techniques de contrôle mécanique en temps réel. Enfin, les mathématiciens analysent les surprenantes propriétés numériques des figures de jonglerie.

La jonglerie est un art antique : la plus ancienne illustration connue de cet art a été trouvée dans la tombe du prince égyptien Beni Hassan XV, qui a régné sur le Moyen Empire entre 1994 et 1781 avant notre ère. Toutefois, la première étude scientifique dont nous ayons connaissance ne date que de 1903 : Edgar James Swift publia, dans le *Journal américain de psychologie*, un article où il décrivait la rapidité avec laquelle certains étudiants

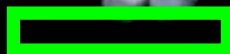
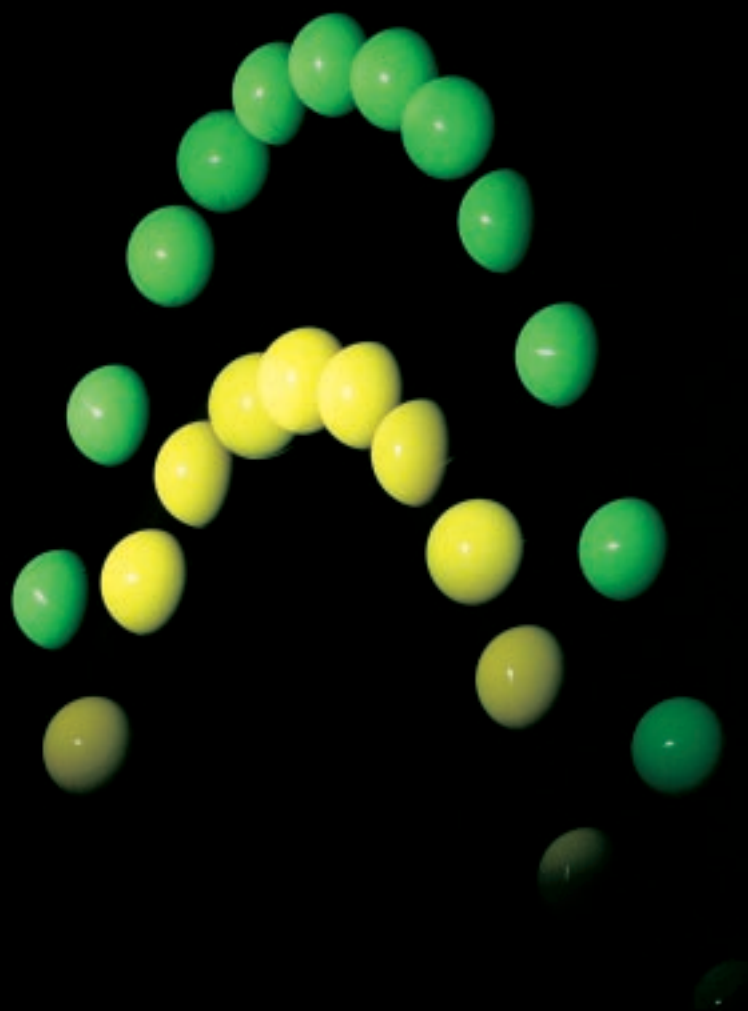
apprenaient à lancer deux balles avec une main. Dans les années 1940, les premiers ordinateurs furent utilisés pour calculer les trajectoires d'objets lancés et l'on fonda l'Association internationale des jongleurs. Dans les années 1950 et 1960, les premières applications des études de la jonglerie apparurent : généralement, on utilisait la jonglerie pour comparer les méthodes générales d'apprentissage de la psychomotricité.

Enfin, dans les années 1970, la jonglerie fut étudiée pour elle-même : à l'Institut de technologie du Massachusetts, Claude Shannon créa ses machines à jongler et formula le théorème de la jonglerie, qui établit une relation entre la position des balles et l'action des mains. Seymour Papert et d'autres chercheurs du Projet MAC (qui devint par la suite le Laboratoire d'intelligence artificielle de l'Institut de technologie du Massachusetts) étudièrent la manière dont certaines personnes maîtrisent l'art de la jonglerie et fondèrent le Club de jonglerie de l'Institut, l'une des plus anciennes organisations consacrées à la jonglerie encore existante. Les mathématiques de la jonglerie apparurent dans les années 1980, avec l'élaboration d'une notation particulière pour résumer les figures de jonglerie (voir l'encadré en pages 82 et 83).

Avec trois balles, la plupart des néophytes essaient de jongler en exécutant la figure de la douche (où les balles décrivent un ovale), bien que la figure de la cascade (où les mains se lancent les balles en alternance, formant un



1. LES JONGLEURS CHEVRONNÉS se fondent plus sur leurs sensations tactiles que sur leur vue. Ils peuvent exécuter les yeux bandés, durant quelques minutes, quelques figures de jonglerie simples. Par exemple, un simple échange de balles (page en vis-à-vis), une fontaine à quatre balles (coin supérieur gauche) ou une cascade à trois balles (ci-dessus).



huit couchée) soit beaucoup plus facile. On apprend à jongler avec trois balles en quelques heures ou en quelques journées, mais avec quatre balles, la durée d'apprentissage atteint plusieurs mois, et il faut parfois plusieurs années pour affiner le toucher et le lancer, jusqu'à devenir capable de jongler avec cinq balles.

Le record mondial du plus grand nombre d'objets avec lesquels on ait jonglé (où chaque objet est lancé et rattrapé au moins une fois, connu sous

le nom de «masse») est de 12 anneaux, 11 balles ou 8 massues. Le record dépend du type d'objets utilisés, parce que la facilité de prise diffère, de même que la marge d'erreur possible afin d'éviter les collisions.

Les limites dans la courbe d'apprentissage

La pesanteur est la principale force que le jongleur doit maîtriser : chaque balle doit être lancée suffisamment haut pour

que le jongleur ait le temps de s'occuper des autres balles. Le temps passé en l'air par une balle est proportionnel à la racine carrée de la hauteur du lancer. La vitesse de lancer – et la hauteur maximale que la balle doit atteindre – augmente rapidement avec le nombre d'objets avec lesquels on jongle.

L'imperfection inévitable des gestes engendre des erreurs de trajectoire et de synchronisation. Si l'on jongle trop bas, les balles sont plus rapprochées, ce qui augmente les risques de collisions. On doit alors lancer et rattraper rapidement les balles, ce qui peut provoquer des erreurs. Inversement, si on lance les balles plus haut, on dispose de plus de temps pour éviter les collisions, mais les erreurs sont amplifiées. Pour des lancers de quelques mètres seulement, une erreur de deux ou trois degrés sur la direction du lancer provoque une erreur de 30 centimètres sur le point de retom-



2. LA PLUS ANCIENNE REPRÉSENTATION DE JONGLEURS connue a été retrouvée dans la tombe du prince Beni Hassan XV, qui régna sur le Moyen Empire d'Égypte au XVIII^e siècle avant notre ère.

Les mathématiques de la jonglerie

L'une des méthodes utilisées par de nombreux jongleurs pour résoudre les figures qu'ils exécutent est la notation d'échange de position inventée aux alentours de 1985 par Paul Klimek et Michael Day. L'échange de position est une notation compacte qui représente l'ordre dans lequel les objets sont lancés et rattrapés dans chaque cycle de jonglerie, partant du principe que les lancers surviennent selon des rythmes qui sont espacés de manière égale dans le temps.

Considérons, par exemple, la cascade à trois balles. La première balle est lancée aux temps 0, 3, 6..., la deuxième aux temps 1, 4, 7..., et la troisième aux temps 2, 5, 8... La notation d'échange de position utilise le temps entre les lancers de chaque balle pour caractériser la figure. Dans cette cascade, le délai entre les lancers de toute balle est de trois temps, donc son échange de position est 33333..., ou juste 3. La notation de la figure nommée douche (première balle 0, 5, 6, 11, 12..., deuxième balle 1, 2, 7, 8, 13..., troisième balle 3, 4, 9, 10, 15...) se compose de deux chiffres, 51, où 5 se rapporte à la durée du lancer haut, et 1 au temps nécessaire pour faire passer la balle d'une main à l'autre dans la partie inférieure de l'arc de cercle. D'autres échanges de positions à trois balles sont 441, 45141, 531 et 504 (un 0 représente un repos, où aucun rattrapage ni aucun lancer n'est effectué).

La manière la plus aisée de développer l'échange de position pour comprendre la façon dont les balles sont véritablement lancées est de tracer un diagramme de demi-cercles sur une ligne de temps numérotée. Les points correspondant aux nombres pairs sur la ligne représentent les lancers de la main droite, les nombres impairs les lancers de la main gauche.

Par exemple, considérons l'échange de position 531. Écrivons les nombres 5, 3 et 1 plusieurs fois de suite, chaque nombre étant inscrit sous le point suivant de la ligne numérotée en partant de 0 (voir le schéma supérieur de l'encadré, page ci-contre). Le nombre situé au-dessous du point 0 est 5 ; à partir de là, on trace un demi-cercle de cinq unités dont le diamètre va jusqu'au point 5, qui repré-

sente un lancer assez haut pour passer cinq unités de temps en l'air. Le nombre au-dessous du point 5 étant un 1, on trace un demi-cercle de diamètre 1 du point 5 au point 6. Comme le point 6 correspond au nombre 5, le prochain demi-cercle va du point 6 au point 11. On obtient ainsi le trajet dans le temps de la première balle, qui est la même que la balle dans la figure douche 51, décrite précédemment. On répète le procédé à partir des points 1 et 2, afin de trouver le trajet des deux balles restantes. Le résultat est que les première et troisième balles se déplacent toutes les deux selon une figure douche, mais dans des directions opposées, et la deuxième balle se situe entre les deux douches dans un rythme correspondant à une cascade. Si l'on exclut cette dernière balle, on obtient le simple échange de position à deux balles.

Toutes ces séquences de nombres ne peuvent pas être traduites en véritables figures de jonglerie. Par exemple, dans la séquence 21, les deux balles atterrissent simultanément dans la même main (bien qu'il y ait des variantes plus compliquées de notation d'échange de position qui permettent que plus d'une balle soit lancée ou rattrapée en même temps, une prouesse que les jongleurs appellent multiplexage).

La notation d'échange de position a permis l'invention de certaines figures qui deviennent progressivement populaires, parce qu'elles sont spectaculaires, comme la figure 441, ou parce qu'elles sont utiles pour la maîtrise d'autres tours, comme la figure à quatre balles 551 en tant que prélude à l'apprentissage de la cascade à cinq balles. Plusieurs programmes informatiques animent des échanges de positions arbitraires et identifient les figures réalisables. De tels programmes permettent aux jongleurs de visualiser une figure avant de s'y essayer, ou simplement de jeter un coup d'œil à des figures impossibles à réaliser par un être humain.

Les chaînes de nombres qui se dégagent des figures réalisables possèdent des propriétés mathématiques étonnantes. Par exemple, le nombre de balles nécessaires pour une figure particulière est égal à la moyenne numérique des nombres de la séquence d'échange de position. Ainsi la figure 45141 nécessite l'emploi de $(4 + 5 + 1 + 4 + 1)/5$,

bée.

Le théorème de Shannon résume les contraintes temporelles de la jonglerie, définissant les relations qui existent entre les moments où les mains sont vides ou pleines, et le temps que chaque balle passe en l'air : avec plus de balles, on a moins de liberté pour varier la rapidité de la figure, et, quand on jongle avec un grand nombre de balles à une certaine hauteur, une variation minime de la vitesse de lancer détruit la figure que l'on souhaite exécuter.

Les spécialistes de la psychomotricité ont étudié comment les jongleurs coordonnent leurs bras pour bouger en rythme et à la même fréquence, malgré toutes ces contraintes. Ils empruntent notamment des concepts à la théorie mathématique des oscillateurs couplés (voir *Oscillateurs couplés et synchronisation biologique*, par Steven Strogatz et Ian Stewart, *Pour la Science*, février 1994).

Le phénomène principal de l'oscillation couplée est la synchronisa-

tion : la tendance de deux membres à se mouvoir à la même fréquence. Le type particulier de coordination manifesté par les mains en train de jongler dépend de la figure réalisée. Dans la cascade, par exemple, le croisement des deux balles entre les mains requiert que l'une des mains attrape à la même cadence que l'autre main lance une balle. Les mains travaillent en alternance : une main attrape une balle après que l'autre en a lancé une.

En revanche, la figure de la fontaine (quatre balles, deux par main) peut être exécutée de deux manières : en lançant (et en attrapant) les balles simultanément avec les deux mains (synchrone) ou bien en lançant une balle avec une main et en rattrapant une autre balle avec l'autre main en même temps (asynchrone). En principe, on peut exécuter la fontaine avec des fréquences différentes pour chaque main, mais cette coordination est difficile.

La tendance des membres à se

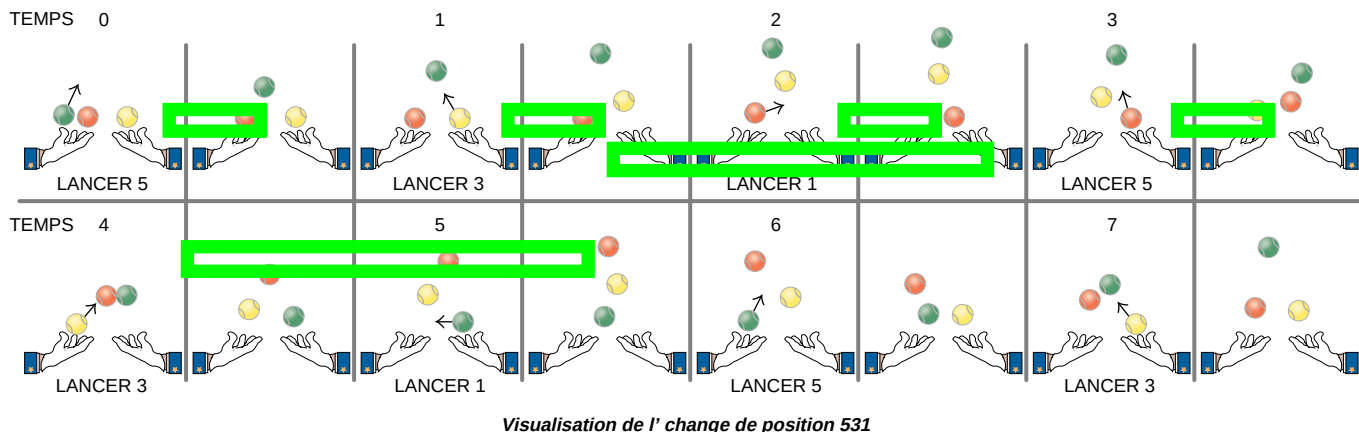
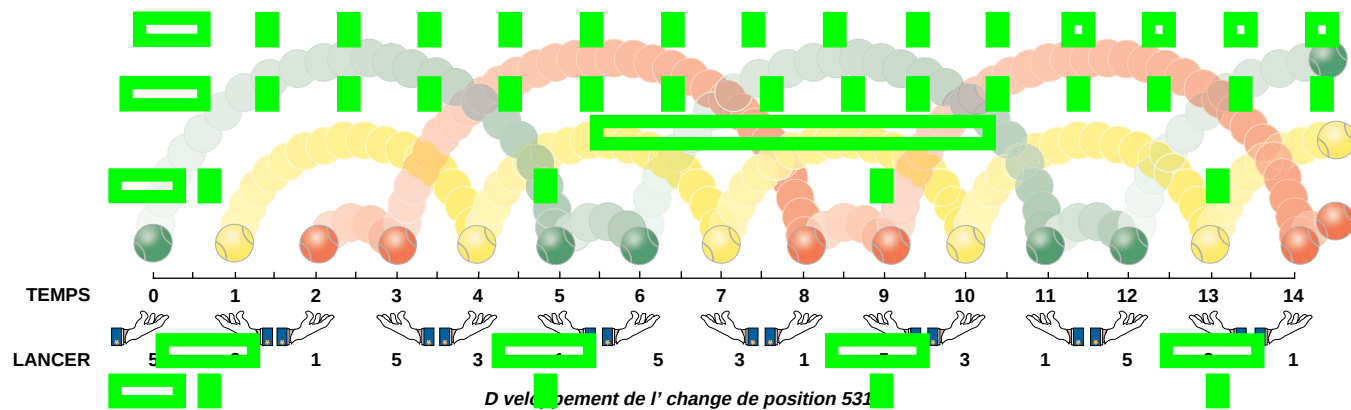
synchroniser.

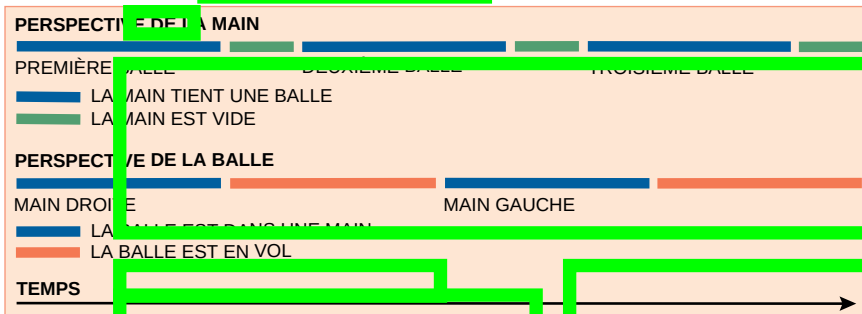
Quelles sont les contraintes physiques et temporelles de la jonglerie? Un modèle réaliste doit aussi inclure au moins trois facteurs, qui compliquent la prise en compte de ces contraintes. Tout d'abord, l'oscillation de la main qui jongle n'est pas uniforme, parce qu'elle contient une balle pendant seulement une partie de son mouvement. D'autre part, la précision du lancer et du rattrapage n'est obtenue qu'au prix de modifications des mouvements. Enfin, la synchronisation repose sur une combinaison d'informations visuelles, sensibles et mémorielles.

Ces trois facteurs rendent les figures de jonglerie chevronnées, deux lancers ou deux rattrapages ne sont jamais identiques. L'analyse de cette variabilité fournit des indications précieuses sur la stratégie générale qui permet d'exé-

c'est-à-dire trois balles. Le nombre d'échanges de positions réalisables qui sont longs de n chiffres en utilisant b balles (ou moins) est b à la puissance n . Malgré sa simplicité, la formule a été étonnamment difficile à prouver. La théorie des échanges de positions ne parvient pas à décrire aussi complètement que possible toutes les figures de jonglerie possibles, parce qu'elle prend uniquement

en compte l'ordre dans lequel les balles sont lancées et rattrapées. Elle ignore d'autres aspects de la jonglerie, tels que la situation et le style de lancers et de rattrapages. Un grand nombre des figures les plus populaires, comme le lancer d'une balle au-dessous de la jambe ou derrière le dos, font partie d'une cascade normale et possèdent la même notation d'échange de position.





3. LE THÉORÈME DE LA JONGLERIE, proposé par Claude Shannon, de l'Institut de technologie du Massachusetts, est schématisé pour la cascade à trois balles. L'équation exacte est $(T + B)/M = (V + B)/N$, où T est le temps passé par une balle en vol, B est le temps qu'une balle passe dans la main, V est le temps pendant lequel une main est vide, N est le nombre de balles avec lesquelles on jongle, et M est le nombre de mains. On peut montrer le théorème en suivant un cycle complet à partir du point de vue de la main, puis de la balle, et en mettant ensuite les deux en équation.

cuter des figures enchaînées.

Les jongleurs contrôlent mieux les lancers que les rattrapages, cherchant à obtenir les angles, des vitesses de lancement, des positions et des hauteurs de lancers précis. Conformément au théorème de Shannon, ce qu'on nomme le «rapport d'arrêt» associé à une hauteur de lancer est une mesure essentielle de la vitesse d'exécution : c'est la proportion du temps pendant lequel une main tient une balle entre deux rattrapages (ou lancers). Généralement, quand ce rapport est grand, la probabilité de collision dans l'air est faible, car alors la main tient la balle pendant un temps relativement long, et a donc la possibilité de lancer de manière précise. En revanche, quand le rapport d'arrêt est faible, le nombre moyen de balles en l'air est important, ce qui facilite les corrections, puisque les mains disposent de plus de temps pour se replacer. Dans ce cas, la probabilité de collision augmente.

Les jongleurs débutants doivent choisir des rapports d'arrêt notables, afin d'améliorer la précision de leurs lancers. Les jongleurs plus expérimentés privilégient des rapports d'arrêt inférieurs, particulièrement lorsqu'ils jonglent avec trois balles, car ils ont ainsi une plus grande liberté de modifier la figure exécutée. Les mesures effectuées par l'un d'entre nous (P. Beek) démontrent que le rapport d'arrêt retenu dans la figure de la cascade est compris entre 0,5 et 0,8, avec des valeurs fréquemment proches de 3/4, 2/3 ou 5/8. Autrement dit, dans une cascade à trois balles, les balles peuvent passer deux fois plus de temps en l'air que dans les mains. Une telle proportion indiquerait que les jongleurs parviennent à un équilibre entre

les exigences conflictuelles de stabilité et de flexibilité, corrigeant les erreurs et les perturbations extérieures. En outre, la tendance des rapports d'arrêt à être des fractions simples révèle une tendance humaine à rechercher des solutions rythmiques à des tâches physiques.

La jonglerie avec plus de trois balles réduit l'intervalle des valeurs possibles pour les rapports d'arrêt, car les balles doivent être lancées plus haut et plus précisément. Avec trois objets, on a encore de vastes possibilités de modification d'adaptation et de figures spectaculaires. Avec neuf objets, il n'existe qu'un nombre limité de manières de jongler.

Ne regardez pas les balles

La modélisation des mouvements de jonglerie n'indique en rien la coordination qu'il doit exister entre les mains et les yeux. L'œil, toutefois, ne doit pas suivre une balle en particulier : son attention doit s'échanger entre les balles, afin de voir uniquement une partie de la trajectoire des balles.

Quelle partie de trajectoire est la plus riche en informations? Quelle partie doit-on observer? «Regardez le point le plus haut» et «lancez la balle suivante lorsque la précédente atteint le sommet», conseille-t-on généralement. À l'Institut de technologie du Massachusetts, en 1974, Howard Austin a étudié la région autour du sommet de la trajectoire que devaient voir les jongleurs moyennement expérimentés pour continuer à jongler correctement. Il a placé devant les yeux et les mains des jongleurs un écran en éventail où il avait découpé une encoche, et il a observé que les jongleurs par-

venaient à rattraper les balles même lorsque trois centimètres seulement du sommet de la trajectoire de la balle étaient visibles. Les balles n'étaient ainsi visibles que pendant 50 millisecondes environ : ce bref aperçu du zénith de la trajectoire des balles suffisait aux jongleurs.

En 1993, à l'Université libre d'Amsterdam, Tony van Santvoord a étudié plus en détail les relations entre les mouvements des mains et la vision des balles. Il a demandé à des jongleurs moyennement expérimentés d'exécuter la figure de la cascade à trois balles en portant des lunettes à cristaux liquides, qui s'ouvraient et se fermaient à intervalles définis, ne donnant qu'une vision intermittente des balles. D'après la relation existant entre le mouvement des balles dans l'air et le rythme défini par les verres des lunettes, on a déduit la position des balles lorsque les verres étaient fermés, les segments de la trajectoire visible qui étaient les plus utiles aux jongleurs et le degré de coordination entre les mouvements des mains et l'information visuelle.

Dans certains cas, les jongleurs qui ont participé aux expériences ont modifié leurs mouvements pour s'adapter à l'ouverture et à la fermeture des lunettes : ils s'arrangeaient alors pour voir les balles juste après leur culmination. Les expériences ont également montré que la vue des balles devient moins importante après une période d'entraînement : les jongleurs novices et de niveau moyen utilisent beaucoup leur vue, mais les jongleurs expérimentés se fondent davantage sur les sensations qui leur viennent du contact entre les mains et les balles. Dans les années 1890, le jongleur Jean-Eugène Robert-Houdin pouvait jongler avec quatre balles tout en lisant un livre, et de nombreux jongleurs chevronnés peuvent jongler avec un bandeau sur les yeux pendant plusieurs minutes.

On suppose que, pendant l'apprentissage, la vision de la balle en mouvement étalonne graduellement le sens du toucher : par le toucher, un expert détecte immédiatement une légère variation dans l'angle de lancement ou dans l'énergie fournie à la balle, tandis qu'un novice doit constater visuellement les effets de ses erreurs sur la trajectoire des balles. Par conséquent, les corrections apportées par un expert préservent souvent l'intégrité

de la figure. En revanche, les ajustements effectués par les jongleurs moins entraînés perturbent généralement la stabilité générale de la figure.

Des robots qui jonglent

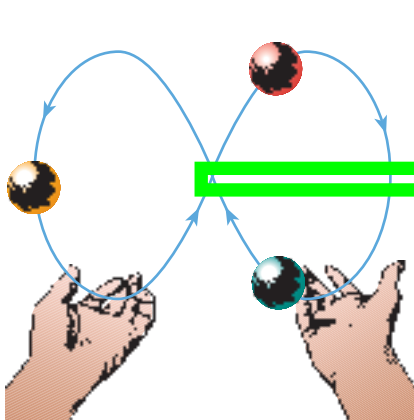
Ayant étudié la jonglerie humaine, certains chercheurs ont voulu tester leur compréhension des mouvements en construisant des robots qui jonglent. De telles machines serviraient à l'élaboration d'automates plus évolués. La jonglerie présente en effet bien des aspects de la vie quotidienne : certains gestes ressemblent à ceux de la conduite automobile dans une rue encombrée, au rattrapage des balles par fort vent, à la marche dans une pièce jonchée d'objets. Toutes ces tâches exigent une anticipation exacte des événements qui vont se dérouler afin d'organiser les actions ulté-

rieures. Dans les années 1970, C. Shannon fut l'un des premiers à construire un robot jongleur : de petites billes d'acier sont expulsées d'un tambour étroit. Dans la machine de C. Shannon, les bras sont solidaires et forment un V. L'ensemble se balance attrapant une balle lorsqu'il descend et lançant une balle lorsqu'il remonte. Les erreurs de lancement sont corrigées par l'utilisation de rainures, au centre des bras, qui stabilisent les balles à leur arrivée. Rattrapées près du sommet de leur trajectoire par un bras, les balles retombent sur la rainure. Le mouvement descendant du bras ramène la balle à la fin de la rainure (à l'extrémité du bras) ce qui donne une énergie suffisante à la balle pour effectuer un lancer. La jonglerie par rebond est plus facile à exécuter que celle qui implique un lancer, parce que les balles sont

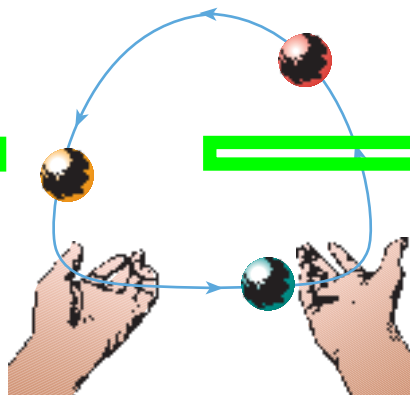
attrapées au sommet de leur trajectoire, lorsque leur vitesse de déplacement est la plus faible. La construction originale de C. Shannon comprenait trois balles, mais, depuis, Christopher Atkeson et Stefan Schaal ont construit une machine qui jongle avec cinq balles, à l'Institut de technologie de Géorgie.

Bien que les robots qui jonglent par rebond soient très habiles, on n'a pas encore réussi à construire un robot capable de jongler en lançant trois balles en cascade. On progresse toutefois : certaines machines attrapent et frappent des balles en l'air ; d'autres jonglent en deux dimensions. Dans les années 1980, Marc Donner, du Centre de recherches d'IBM de Yorktown Heights, a utilisé un plan lisse et incliné. Il était équipé de deux mécanismes de lancement se déplaçant sur des rails le long de la bordure infé-

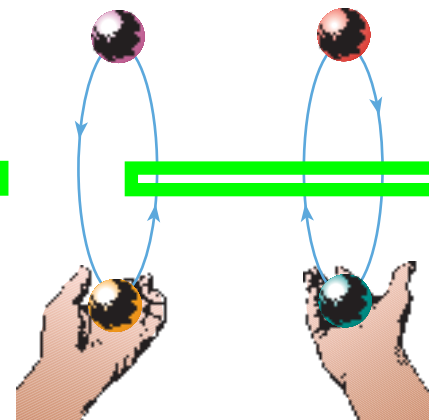
Figures de jonglerie courantes



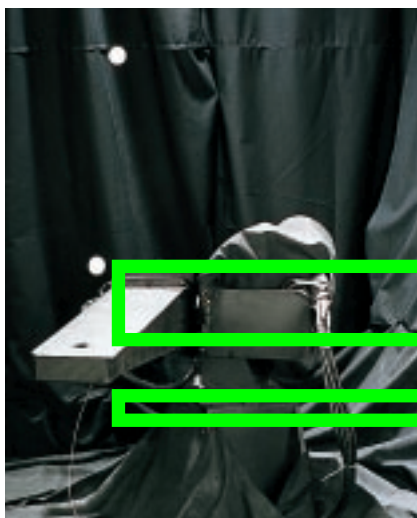
CASCADE À TROIS BALLES



DOUCHE À TROIS BALLES



FONTAINE À QUATRE BALLES (SYNCHRONE)



4. UN BRAS ROBOTISÉ peut frapper deux balles et exécuter indéfiniment la figure de la fontaine. Une caméra enregistre la trajectoire des balles, et un algorithme spécial, qui corrige les erreurs et modi-

fie la cadence de la jonglerie, commande le mouvement du robot. L'appareil a été construit par Daniel Koditschek et Alfred Rizzi, à l'Université du Michigan.

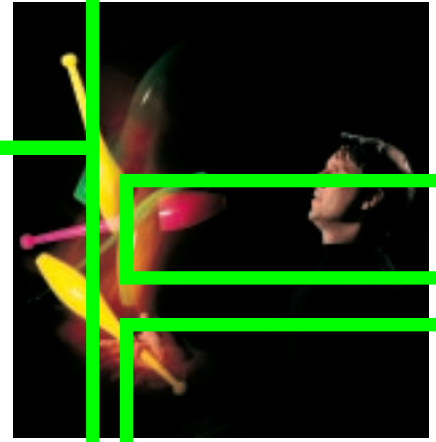
rieure de la table.

En 1989, Martin Bühler, à l'Université Yale, et Daniel Koditschek, à l'Université du Michigan, ont remplacé le dispositif de lancement circulant sur des rails par une barre en forme de boomerang, recouverte de velours. Pivotant autour d'un axe, chaque partie de cette barre frappe alternativement les palets. Pour contrôler la barre et obtenir ainsi une jonglerie permanente, les chercheurs ont utilisé ce qu'on appelle l'«algorithme miroir».

Cette machine utilise essentiellement deux idées. La première est de transformer la trajectoire continue du palet à l'aide d'une fonction non linéaire adéquate. Cela permet d'utiliser la connaissance imparfaite que l'on possède des caractéristiques (position, vitesse) du palet au point d'impact. La seconde est d'analyser l'énergie de la balle pour savoir si elle correspond à l'énergie d'un lancer parfait, afin de stabiliser le mouvement vertical du palet. Dès lors, le programme enregistre la position du palet, calcule la trajectoire de référence, ainsi que l'énergie réelle souhaitée pour le palet ; puis il calcule le moment où il faut frapper le palet et la force avec laquelle il faut le faire. Grâce à une version étendue de l'algorithme miroir, le robot exécute aussi une figure utilisant une seule main, avec deux palets et en deux dimensions. Il frappe le palet en ligne droite, alternativement avec les parties gauche et droite de la barre pivotante, dans deux colonnes séparées.

L'algorithme miroir donne des résultats impressionnants. Quand on perturbe l'un des palets, le bras du robot effectue des mouvements saccadés qui semblent artificiels aux yeux d'un jongleur humain, mais qui provoquent un retour rapide à une jonglerie normale. L'algorithme miroir commande efficacement la frappe du palet, mais ne s'étend pas au problème difficile qu'est la jonglerie avec des rattrapages contrôlés.

Outre la jonglerie par frappe et rebond, les robots parviennent à exécuter une foule d'activités liées à la jonglerie : faire valser des baguettes, faire sauter, projeter et attraper des balles dans une main en forme d'entonnoir et jouer une forme modifiée de ping-pong. Malgré tous ces progrès, aucun robot ne jongle d'une manière qui puisse ressembler, même



5. LE JONGLEUR PROFESSIONNEL Tony Duncan dont les mains expertes apparaissent dans les clichés présentés ici, jongle également avec des massues.

vaguement, à la jonglerie humaine. Toutefois l'étude de la science de la jonglerie est récente, et les progrès réalisés au cours des 20 dernières années ont été remarquables. Il est possible que nous n'ayons pas à attendre longtemps avant de poser la devinette : «Comment le robot peut-il traverser le pont avec trois boulets de canon?»

Peter BEEK et Arthur LEWBEL peuvent jongler respectivement avec trois et huit balles. P. Beek est spécialiste de psychomotricité à l'Université libre d'Amsterdam. A. Lewbel a fondé le Club de jonglerie de l'Institut de technologie du Massachusetts et écrit dans la revue *Le monde de la jonglerie*.

Peter BEEK et Michael TURVEY, *Temporal Interacting in Cascade Juggling*, in *Journal of Experimental Psychology*, vol. 18, n° 4, pp. 934-947, novembre 1992.

Scientific Aspects of Juggling, in Claude Elwood Shannon : *Collected Papers*, sous la direction de N.J.A. Sloane et A.D. Wyner, IEEE Press, 1993.

J. BÜHLER, D. EISENBUD, R. GRAHAM et C. VORICHT, *Juggling Drops and Descents*, in *American Mathematical Monthly*, vol. 101, n° 6, pp. 507-519, juin-juillet 1994.

Tony van SANTVOORD et P. BEEK, *Phasing and the Disking of Optical Information in Cascade Juggling*, in *Ecological Psychology*, vol. 6, n° 4, pp. 239-263, 1994.

Ian STEWART, *Juggling by Numbers*, in *New Scientist*, n° 1969, pp. 34-38, 18 mars 1995.

Service d'informations sur la jonglerie sur le serveur Web, à l'adresse : <http://www.hal.com/services/juggle/>

De Diophante à Fermat

CHRISTIAN HOUZEL

Le théorème de Fermat, récemment démontré, a son origine dans des problèmes qui datent du deuxième millénaire avant notre ère.

Sur son exemplaire des *Arithmétiques* de Diophante, en marge du problème 8 du livre II, le magistrat Pierre de Fermat a écrit : «Aucun cube ne peut être partagé en deux cubes, soit un cube en deux cubes, soit un bicarré en deux bicarrés, soit en général une puissance quelconque supérieure au carré en deux puissances de même degré ; j'en ai découvert une démonstration véritablement merveilleuse que cette marge est trop étroite pour contenir».

De nombreux mathématiciens ont cherché cette démonstration sans la trouver, jusqu'à ce que, en 1994, Andrew Wiles, de l'Institut Newton, à Cambridge, utilisant des outils mathématiques complètement inconnus au temps de Fermat, vienne à bout de ce que l'on a nommé «grand théorème de Fermat», alors qu'il ne s'agissait que d'une conjecture. Quelle preuve Fermat avait-il trouvée ? On ignore, et il y a peu de chances que les historiens des mathématiques parviennent jamais à le savoir. En revanche, on découvre encore des fragments de l'histoire

de Fermat, qui fut, pour les mathématiciens, une source d'inspiration. Dans cet article, nous considérerons l'histoire du théorème de Fermat ; un autre article, de Yves Hellegouarch,

dans le prochain numéro de *Pour la Science*, montrera comment A. Wiles a résolu le problème.

Le problème 8 du livre II de Diophante était : «Trouver un cube en deux carrés». Cette équation qu'on noterait aujourd'hui $x^2 + y^2 = z^2$ est dite diophantienne, parce que l'on s'impose de trouver des nombres x, y, z qui soient rationnels, c'est-à-dire exprimables sous la forme de fractions. Les triplets (x, y, z) sont également nommés pythagoriciens, parce qu'ils peuvent être associés à des côtés de triangles

rectangles qui vérifient alors le théorème de Pythagore.

Une tablette babylonienne

L'étude de tels «triangles rectangles en nombres», c'est-à-dire dont les côtés sont des nombres rationnels, était centrale dans l'analyse diophantienne traditionnelle ; elle remonte à une très haute antiquité, puisque une tablette babylonienne du début du II^e millénaire avant notre ère contient une table numérique visiblement liée aux triplets

pythagoriciens. Dans son état actuel (voir la figure 2), elle se compose de 15 lignes, numérotées de 1 à 15 dans la colonne de droite, avec trois autres colonnes ; des traces de colle, sur une cassure, dans la colonne de gauche, montrent qu'un morceau de la tablette a été perdu à l'époque moderne. Le titre de la

tablette n'est pas lisible, mais la deuxième colonne indique des «nombres de la largeur», la troisième colonne indique des «nombres de la diagonale», et la quatrième colonne donne un «nombre».

Les nombres écrits en notation sexagésimale (chaque ordre valant soixante fois le précédent), sans indication de la position de la virgule, avec laquelle on sépare aujourd'hui les unités des chiffres



1. Pierre de Fermat, né en 1601 près de Toulouse, est le fondateur de la théorie des nombres. Fermat était magistrat, et il ne participa à la vie mathématique de son époque que par des correspondances privées avec d'autres savants.

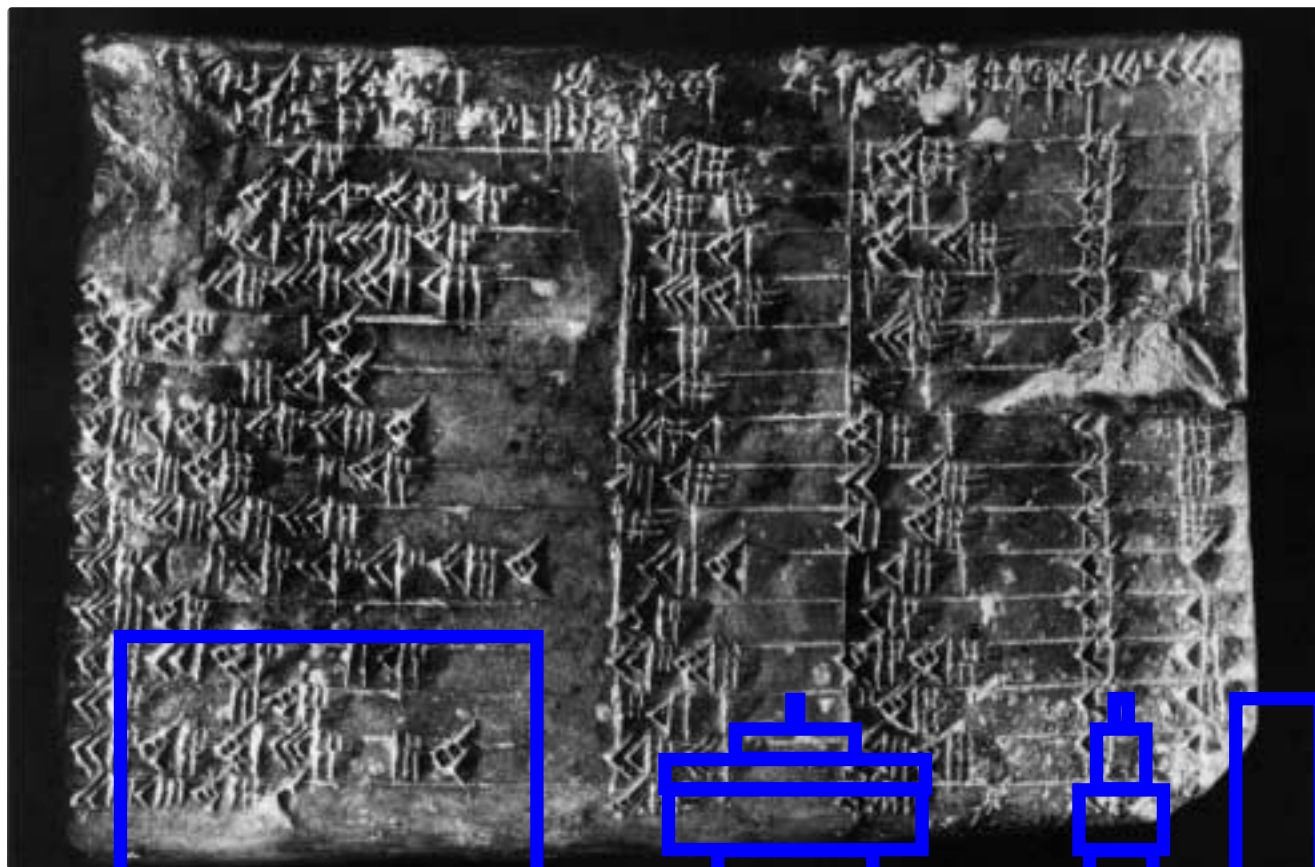
décimaux (1,59 peut signifier $1 \times (59/60) + 0/(60 \times 60) + 15/(60 \times 60 \times 60)$, soit 1,9834...; 1,59 peut signifier $1 \times 60 + 59$, soit 119.

Sur le bas de la figure 2, on a reconstitué la première colonne, incomplète en raison de la cassure, en notant entre crochets les chiffres manquants ; les

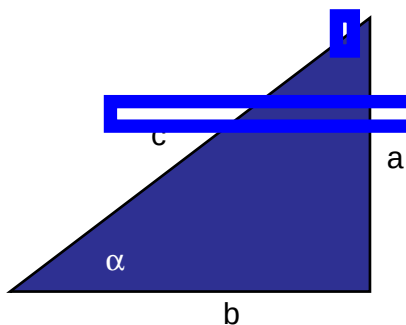
régulièrement de la première ligne ($1 + 59/60 + 15/60^3 = 1,9834...$ à la dernière ($1 + 23/60 + 13/60^2 + 46/60^3 + 40/60^4 = 1,387188...$). Cette décroissance s'éclaire si l'on interprète chaque nombre de la deuxième colonne comme un côté b de l'angle droit d'un triangle rectangle, et le nombre correspondant de la troisième colonne comme l'hyp-

hypoténuse, est alors le rapport c^2/a^2 , encore égal à $1/\sin^2\alpha$, où a est l'autre côté de l'angle droit et α l'angle opposé au côté de longueur a .

Cette tablette comporte quelques erreurs indiquées en couleur sur la figure, mais elle est remarquable : les valeurs du côté a (non indiquées dans la table) sont toutes des nombres entiers



2. CETTE TABLETTE BABYLONNIENNE mentionne des triplets pythagoriciens, c'est-à-dire qui peuvent être des longueurs de côtés de triangles rectangles. La notation est sexagésimale. Certains chiffres manquants sont indiqués entre crochets. La deuxième colonne contient des valeurs qui sont des côtés b de l'angle droit, la troisième colonne contient des valeurs de l'hypoténuse c et la première colonne contient des rapports c^2/a^2 , où a est l'autre côté de l'angle droit.



I	II	III	IV
[1, 59, 0, 15]	1,59	2,19	1
[1,56,56,]58,14,50,6,15	56,7	12,1	2
[1,55,7,]41,15,32,45	1,16,41	1,50,49	3
[1,]5[3,1]0,29,32,52,16	3,31,49	59,1	4
[1,]48,51,1,40	1,5	1,37	5
[1,]47,6,4,1,40	5,19	8,1	6
[1,]43,11,56,28,26,40	38,11	59,1	7
[1,]41,33,59,3,45	13,19	20,49	8
[1,]38, 33,59,3,45	9,1	12,49	9
1,35,10,2,28,27,34,26,40	1,22,41	2,16,1	10
1,33,45	45	1,15	11
1,29,21,54,2,15	27,59	48,49	12
[1,]27,0,3,45	7,12,1	4,49	13
1,25,48,51,35,6,40	29,31	53,49	14
[1,]23,13,46,40	56	53	15

dont 2, 3, 5 sont les seuls facteurs premiers, de sorte que leurs inverses ont des expressions sexagésimales exactes : on peut donc penser que les Babyloniens avaient une méthode systématique pour obtenir des triangles rectangles en nombres entiers, analogue à nos formules $a = 2pq$, $b = p^2 - q^2$ et $c = p^2 + q^2$ (la première ligne serait donnée par $p = 12$, $q = 5$, etc.). Le triangle de la onzième ligne a ses côtés (60, 45, 75) proportionnels au triplet pythagoricien le plus simple (4, 3, 5).

Certains historiens ont prétendu que les Égyptiens connaissent ce triplet avant les Babyloniens. Ils n'en ont pas laissé de preuves. En revanche, les mathématiciens grecs, entre le V^e et le III^e siècle avant notre ère, étaient familiers de ces triplets : le *commentaire* de Philon mentionne explicitement que les triplets (4, 3, 5), (12, 5, 13), (8, 15, 17), (24, 7, 25), (12, 35, 37) étaient utilisés pour construire des rectangles.

Les études de Diophante

La construction des triplets pythagoriciens est le seul résultat d'analyse diophantienne (avant Diophante) présent dans les *Éléments* d'Euclide (c'est un lemme, ou résultat préalable, pour la proposition 28 du livre X. Le cas particulier où q est égal à $p - 1$ est d'ailleurs attribué par le philosophe Proclus à Pythagore (VI^e siècle avant notre ère) et celui où q est égal à 1 à Platon.

De combien le travail de Diophante est-il ultérieur ? Nul ne sait exactement, car on ignore si ce mathématicien alexandrin vivait au II^e siècle de notre ère, ou plutôt au III^e.

de l'*Anthologie palatine*, recueil de poèmes par ou anonymes écrits dans les premiers siècles de notre ère, c'est-à-dire peu après la mort de Diophante, contient un problème d'arithmétique élémentaire qui met en scène sa vie. Le livre XIV de l'*Anthologie palatine* est constitué de devinettes et de problèmes arithmétiques, dont certains sont indé-

terminés, mais très simples, tandis que Diophante, avec ses problèmes très difficiles, est considéré comme le père de la mathématique grecque : le seul problème diophantien difficile connu en dehors des œuvres de Diophante est le problème des bœufs, attribué à Archimède, qui conduit à l'équation du type de Pell-Fermat : $t^2 - 4729u^2 = 1$ (ce problème concerne des bœufs qui paissent dans un pré ; exprimé sous forme d'un poème, il propose un système

Les *Arithmétiques* auraient été composées de 13 livres, mais on ne connaît que certains d'entre eux. Six sont connus par leur texte en grec, à travers de manuscrits dont les plus anciens remontent au XIII^e siècle ; quatre d'entre eux, dont l'original grec est perdu, ont été identifiés en 1971 par l'historien français des mathématiques Roshdi Rashed et publiés en 1984. Aujourd'hui on dispose donc de 10 des 13 livres : les trois premiers en grec (la

DIOPHANTI ALEXANDRINI ARITHMETICORVM LIBRI SEX, ET DE NVMERIS MVLTANGVLIS LIBER VNVS.

CVM COMMENTARIIS C. G. BACHETI V. G.
Conservationibus D. P. de FERMAT Senatoris Tolosani.
Accessit Doctrinae Analyticae Inuentum nouum, collectum
ex varijs eiusdem D. de FERMAT Epistolis.



Excudebat BERNARDVS BOSCH, à Regione Collegij Societatis Iesu.
M. DC. LXX.

3. L'ARITHMÉTIQUE fut rédigée par Diophante au II^e ou au III^e siècle de notre ère. Elle semble avoir été composée de 13 livres, dont seulement dix sont en notre possession : six sont en grecs et quatre sont en arabe. En marge de ce texte, Fermat écrit avoir trouvé une solution nouvelle et ingénieuse qui n'a jamais été retrouvée.

de sept équations à huit inconnues avec quelques conditions).

œuvre intitulée *Les Arithmétiques* et un opusculé sur les nombres polygonaux, c'est-à-dire représentables par des sommets de polygones (par exemple, les carrés sont les nombres carrés, que l'on peut associer aux nombres de sommets de carrés emboîtés de plus en plus grands) ; on lui attribue également des *Porismes* aujourd'hui perdus.

traduction arabe est perdue, mais on la connaît par des commentaires du X^e siècle), les quatre suivants en arabe, et les trois derniers en grec.

Dans les *Arithmétiques*, Diophante examine diverses espèces de nombres : les carrés, les cubes et les espèces que l'on obtient par combinaison des deux premières sortes (un carré-carré, par exemple, est un carré dont le côté serait un carré) ; il examine des problèmes où ces espèces sont combinées par addition, soustraction ou multiplication, de manière à donner des carrés ou des cubes. Les nombres considérés sont rationnels positifs (et pas seulement des entiers, comme dans la tradition euclidienne), et Diophante se contente généralement de trouver une solution pour chaque problème. Par exemple, pour le problème 8 du livre II, il cherche à diviser 16 en une somme de deux carrés inconnus comme carré du nombre (*dunamis*), soit x^2 ; l'autre carré est $16 - x^2$, que Diophante cherche à égaler au carré

diminué d'autant d'unités qu'il y a dans le côté de 16, par exemple $a(2x - 4)$, ce qui donne l'équation $5x^2 = 16x$, d'où $x = 16/5$.

Les manipulations de Diophante conduisent à ne conserver qu'une espèce égalée à une espèce : comme le dit d'Alembert (à l'article «Diophante» de l'*Encyclopédie*), il s'agit de «manier

tellement les inconnues ou l'inconnue, que le carré et les plus hautes puissances de cette inconnue disparaissent, et qu'il ne reste que l'inconnue au premier degré.

Les problèmes qui se rattachent aux triangles rectangles en nombres rationnels sont nombreux dans les *Arithmétiques*. Tantôt ces triangles interviennent comme auxiliaires pour résoudre un autre problème, comme dans le cas du problème du livre III: «trouver quatre nombres tels que le carré de leur somme, augmenté ou diminué de n'importe lequel d'entre eux, fasse un carré». À propos de ce problème, Diophante observe que si $a^2 + b^2 = c^2$, alors $c^2 \pm 2ab = (a \pm b)^2$. Il cherche alors quatre triangles rectangles numériques (dont on note respectivement les deux côtés de l'angle droit (a_1, b_1) , (a_2, b_2) , (a_3, b_3) , (a_4, b_4)) ayant la même hypoténuse c ; tous ces nombres doivent alors vérifier $c^2 = a_1^2 + b_1^2 = a_2^2 + b_2^2 = a_3^2 + b_3^2 = a_4^2 + b_4^2$. Il choisit habilement de chercher les quatre nombres sous la forme $2a_1b_1x^2$, $2a_2b_2x^2$, $2a_3b_3x^2$, $2a_4b_4x^2$, le nombre à déterminer, de façon que la somme des quatre nombres soit cx , ce qui donne $x = c/2(a_1b_1 + a_2b_2 + a_3b_3 + a_4b_4)$. Il choisit c égal à 13×5 , soit 65, car il sait que le produit de deux sommes de deux carrés s'écrit de deux manières différentes comme une somme de deux carrés, et donc que 65^2 est somme de deux carrés de quatre manières.

Tantôt Diophante cherche plutôt des triangles rectangles numériques qui vérifient des conditions supplémentaires. Le livre VI, dans la numération grecque, est entièrement consacré à ce genre de problèmes. Par exemple, le problème 3 du livre VI demande de «trouver un triangle rectangle en nombres, dont l'aire, augmentée d'un nombre donné, fasse un carré». Le nombre donné est 5; Diophante cherche le triangle sous la forme (ax, bx, cx) , où (a, b, c) est un triplet pythagoricien, et le carré sous la forme $(mx)^2$; avec ce choix, la condition du problème devient $(m^2 - ab/2)x^2 = 5$. Il faut trouver a, b et m de manière que $m^2 - ab/2$ soit divisible par 5. Diophante trouve à nouveau un changement de variable astucieux: il prend $a = 2$, $b = p^2 - 1/p^2$ et $m = p + 2 \times 5/p$, ce qui conduit au problème auxiliaire: trouver p tel que $100p^2 + 505$ soit un carré. Ce problème est résolu comme le problème 8 du livre II, en posant $100p^2 + 505 = (10p + 5)^2$, d'où $p = 24/5$ et $1/5 \times (265/24)^2 x^2 = 5$, soit $x = 24/53$.

Les mathématiciens arabes

La tradition arabe de l'algèbre a été suscitée par un intérêt croissant pour l'analyse indéterminée, à partir de la première moitié du IX^e siècle (dans les problèmes d'analyse indéterminée, on cherche à résoudre, en nombres rationnels, des systèmes d'équations qui ont plus d'inconnues que d'équations); le vocabulaire employé est emprunté à l'algèbre.

Cependant, à côté de cette lecture algébrique de Diophante, il s'est développée au X^e siècle une lecture plus proprement arithmétique, dont le représentant le plus éminent fut al-Khâzîni. Cette tradition s'intéresse aux problèmes en nombres entiers, et pas seulement rationnels, et elle revient en cela à la représentation euclidienne des entiers par des segments de longueur multiples d'une longueur de base. Elle s'inscrit dans le cadre de la théorie des triangles rectangles en nombres entiers avec le concept de triangle primitif, les trois côtés n'ont pas de facteurs communs) et elle considère de nouveaux problèmes comme celui des nombres «congruents», que nous allons examiner, ainsi que des problèmes impossibles comme la division d'un cube en somme de deux cubes.

Le problème des nombres congruents est posé pour la première

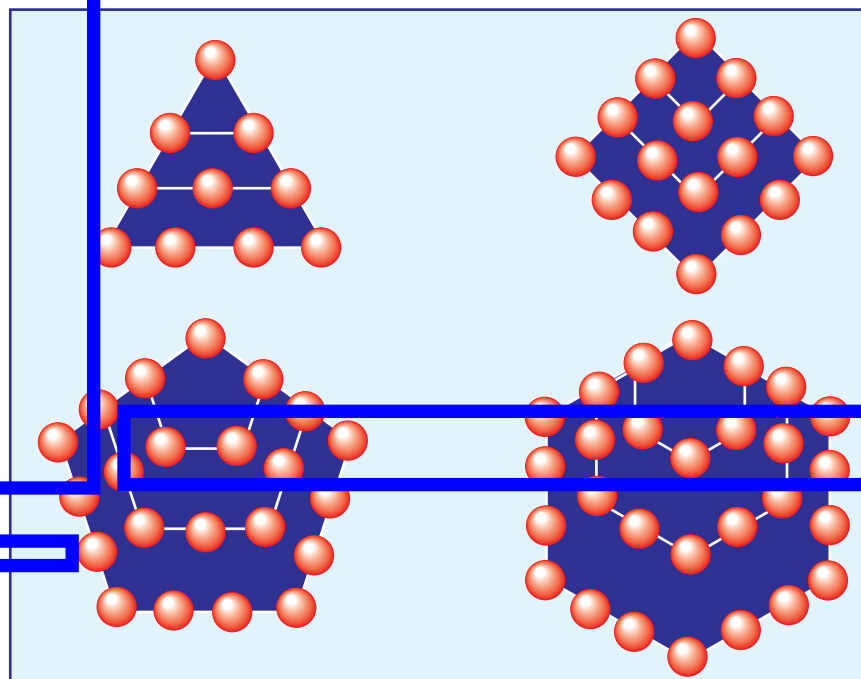
fois dans un traité arabe anonyme, qui ne sera publié qu'en 1861 par l'historien des mathématiques F. Woepcke,

et il a été repris par les mathématiciens. Dans la formulation d'al-Khâzîni, il s'agit de «chercher un nombre carré tel que, si on lui ajoute un nombre donné et si on en retranche ce nombre donné, la somme et la différence soient deux carrés» (ce problème consiste à trouver trois nombres entiers x , y_1 et y_2 tels que $x^2 + a = y_1^2$ et $x^2 - a = y_2^2$).

Al-Khâzîni se réfère au problème 19 du livre II de Diophante («trouver quatre nombres tels que le carré de leur somme augmenté ou diminué de n'importe lequel d'entre eux, fasse un carré»); par addition des deux équations, le double du carré cherché x^2 est somme de deux carrés $y_1^2 + y_2^2$. Une petite note indique que la plus petite valeur de x^2 est la même somme de deux carrés, $x^2 = u^2 + v^2$, où u et v sont respectivement la demi-somme et la demi-différence de y_1 et de y_2 . Alors

si $u^2 + v^2 = x^2$, c'est-à-dire le nombre donné a ; inversement, si $u^2 + v^2 = x^2$ et si $2uv = a$, en posant $y_1 = u + v$ et $y_2 = u - v$, on trouve $y_1^2 = x^2 + a$ et $y_2^2 = x^2 - a$.

Puisque les nombres x, u et v vérifient la relation de Pythagore, x est l'hypoténuse d'un triangle rectangle et a (égal à $2uv$) est quatre fois l'aire de ce triangle; la plus petite valeur de a est



4. DIOPHANTE FUT L'AUTEUR d'un opuscule sur les nombres polygonaux, représentables par des sommets de polygones. Ici on a représenté des nombres triangulaires, des nombres carrés, des nombres pentagonaux et des nombres hexagonaux.

Si l'aire d'un triangle était un carré, il y aurait deux bicarrés dont la différence serait un carré; il s'ensuit qu'on aurait également deux carrés dont la somme et la différence seraient des carrés. Par conséquent, on aurait un nombre carré, somme d'un carré et du double d'un carré, avec la condition que la somme des deux carrés, qui servent à le composer, soit également un carré. Mais si un nombre carré est somme d'un carré et du double d'un carré, sa racine est également somme d'un carré et du double d'un carré, ce que je puis prouver sans difficulté. On conclura de là que cette racine est la somme des deux côtés de l'angle droit d'un triangle rectangle, dont l'un des carrés composants formera la base, et le double de l'autre carré la hauteur.

Ce triangle rectangle sera donc formé par deux nombres carrés, dont la somme et la différence seront des carrés. Mais on prouvera que la somme de ces deux carrés est plus petite que celle des deux premiers dont on a également supposé que la somme et la différence soient des carrés. Donc, si on donne deux carrés dont la somme et la différence soient des carrés, on donne par là même, en nombres entiers, deux carrés jouissant de la même propriété et dont la somme est inférieure.

Par le même raisonnement, on aura ensuite une autre somme plus petite que celle déduite de la première, et en continuant indéfiniment on trouvera toujours des nombres entiers de plus en plus petits satisfaisant aux mêmes conditions. Mais cela est impossible, puisqu'un nombre entier étant donné, il ne peut y avoir une infinité de nombres entiers qui soient plus petits.

La marge est trop étroite pour recevoir la démonstration complète et avec tous ses développements.

Par le même procédé, j'ai découvert et démontré qu'il n'y a aucun nombre triangulaire, sauf l'unité, qui soit un bicarré.

5. LE FILS DE PIERRE DE FERMAT a publié en 1670 les *Arithmétiques* de Diophante avec les annotations marginales de son père. Dans ces œuvres figure la mention du problème de Diophante et le texte où Fermat annonçait avoir résolu ce problème.

24 (on cherche des nombres tous différents), qui correspond au triplet pythagoricien le plus petit (4,3,5).

Al-Khâzin donne ensuite plusieurs méthodes relevant de l'algèbre pour résoudre le problème en nombres rationnels et non plus entiers; les nombres entiers a possibles sont dits congruents. Enfin il établit l'identité $(p^2 + q^2)(p^2 - q^2) = (p^2 + q^2)^2 - (p^2 - q^2)^2$, implicite dans le raisonnement de Diophante sur les nombres représentables de plusieurs manières, comme somme de carrés.

On retrouve cette identité dans le *Livre des nombres carrés* (1225) de Léonard de Pise, encore connu sous le nom de Fibonacci. Bien qu'écrit en latin, ce livre se rattache aux mathématiques arabes; il

est publié à l'occasion une question posée par Léonard de Pise par Jean de Palerme, à la cour de l'empereur Frédéric II: trouver un carré x^2 qui, augmenté et diminué de 5, donne toujours un carré. Léonard commence par l'étude générale du problème en nombres entiers, remplaçant 5 par un nombre entier a ; il établit tout d'abord $(p^2 + q^2)(p^2 - q^2) = (p^2 + q^2)^2 - (p^2 - q^2)^2$ (c'est quatre fois l'aire d'un triangle rectangle), puis il montre que ce nombre est nécessairement un multiple de 24.

Pour obtenir un nombre égal à cinq fois un carré, il prend $p = 5$ et $q = 4$; il obtient alors $a = 720 = 12^2 \times 5$, $x = p^2 + q^2 = 41$, tel que $41^2 + 720 = 49^2$, et $41^2 - 720 = 31^2$, ce qui permet de résoudre

le problème de Jean de Palerme avec $x = 41/12$.

Les problèmes impossibles

Un certain al-Khujandî, au X^e siècle, aurait proposé une démonstration incorrecte du fait que «la somme de deux nombres cubiques n'est pas un cube»; on connaît un texte de cette époque, attribué à un Abû Ja'far (ce qui est d'ailleurs un des noms d'al-Khâzin), qui pourrait bien être cette tentative. L'auteur établit géométriquement que «pour deux nombres cubiques, leur différence est la somme du produit du carré du plus petit côté par la différence des deux côtés, plus le produit de la somme des deux côtés par leur différence, en ensuite par le plus grand côté». Autrement dit: $z^3 - y^3 = y^2(z - y) + (z + y)(z - y)z$. Puis, entraîné par le langage géométrique, il affirme péremptoirement que cette expression n'est pas un cube (au sens géométrique), ce qui n'est évidemment pas une démonstration.

Une liste de 33 problèmes impossibles considérés par Ibn al-Khawwâm al-Baghdâdî, à la fin du XIII^e siècle, est citée par le commentaire qu'en fait un élève, Kamâl al-Dîn al-Fârisî. Al-Baghdâdî écrit: «Nous ne prétendons pas que nous pouvons établir leur impossibilité, mais nous affirmons que nous ne pouvons pas les résoudre». Parmi ces problèmes, le premier s'énonce: «Trouver deux carrés dont la somme et la différence soient des carrés». Autrement dit, un carré ne pourrait pas être la somme de deux carrés. Le 24^{ème} problème est «trouver un triangle rectangle dont les côtés sont des carrés», et le 24^{ème}: «diviser un cube en deux cubes». Ce sont précisément les équations de Fermat pour les exposants 4 et 3.

Fermat enfin

Diophante a été progressivement redécouvert en grec, dans le monde européen, à partir du XVI^e siècle. Le mathématicien italien Rafael Bombelli

(1526-1572) a consulté un manuscrit des *Arithmétiques* à la bibliothèque du Vatican; puis l'érudit W. Holzmann, qui signait Xylander, en a publié une traduction en latin en 1575. Enfin le Français Gaspard Bachet de Méziriac (1581-1638) a publié le texte grec avec un traduction latine en 1621, et c'est dans cette traduction que Fermat a pris

connaissance de Diophante. Dans les marges de son exemplaire personnel, il a mis un certain nombre d'observations, et son fils Samuel a publié en 1670 le texte de Diophante complété par les annotations paternelles. Ces observations sont une source d'informations précieuse pour la connaissance des travaux arithmétiques de Fermat.

Ce dernier, comme avant lui al-Khâzin, distingue entre l'analyse diophantienne en nombres entiers, dite arithmétique, et l'analyse diophantienne en nombres rationnels, plus algébrique et que Fermat rejette du côté de la géométrie, c'est-à-dire de la science des quantités continues. Dans un défi qu'il lance aux mathématiciens en 1657, il commence par ces mots : «Il est à peine quelqu'un qui propose des questions purement arithmétiques, il est à peine quelqu'un qui sache les résoudre. Est-ce parce que l'Arithmétique a plutôt été traitée jusqu'à présent au moyen de la Géométrie que par elle-même ? C'est la tendance qui apparaît dans la plupart des Ouvrages tant anciens que modernes et dans Diophante lui-même. Car s'il s'est écarté de la Géométrie un peu plus que les autres en streignant son analyse à ne considérer que les nombres entiers, il ne s'en est pas dégagé tout à fait, comme le prouvent surabondamment les *Zététiques* de Viète, dans lesquelles la méthode de Diophante est étendue à la quantité continue et, par suite, à la Géométrie». Contrairement à Diophante, Fermat cherche à déterminer toutes les solutions de chaque problème indéterminé.

Le principe unificateur de son analyse en nombres entiers semble être sa méthode de descente infinie : dans cette méthode, on part d'une solution en nombres entiers positifs d'une équation ; on en déduit qu'il existe alors une autre solution, en nombres entiers positifs, mais plus petits que les précédents ; on recommence la construction sur la solution plus petite, on trouve une solution encore inférieure, et on répète indéfiniment le processus. Comme les solutions ainsi obtenues sont des nombres entiers positifs et qu'il n'existe pas de suite infinie décroissante d'entiers positifs (on s'arrête évidemment à 0), l'équation ne peut avoir de solution.

Les principaux problèmes qu'il est parvenu à résoudre par cette méthode sont déjà énoncés dans une lettre au père Mersenne, au début

juin 1638 : trouver un triangle rectangle en nombres, dont l'aire soit un carré ; trouver deux carrés (*bicarrés*) dont la somme soit un carré ; trouver deux carrés (*bicarrés*) dont la somme soit un cube ; trouver trois carrés en progression arithmétique (avec le même écart entre le premier et le deuxième carré qu'entre le deuxième et le troisième) sous la condition que la différence de la progression soit un carré.

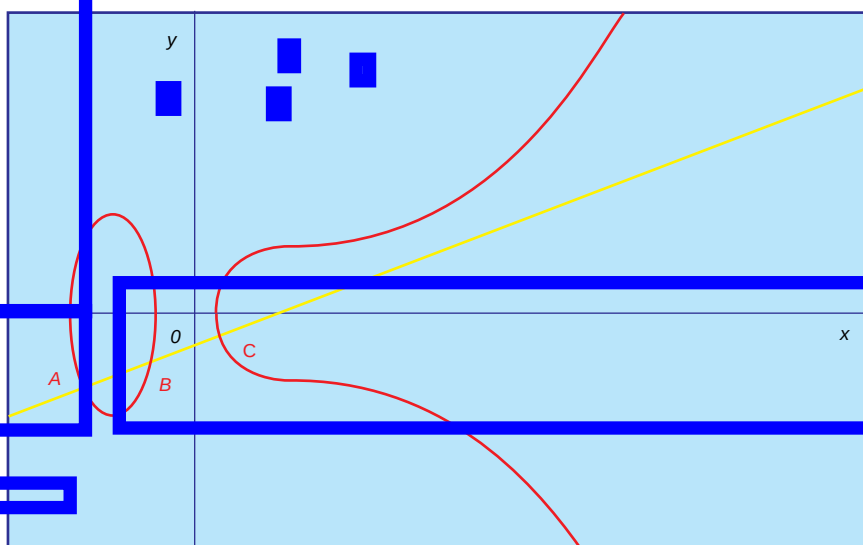
À ces problèmes, Fermat ajoute des théorèmes : (1) Tout nombre est somme d'un, de deux ou de trois «triangles» (c'est-à-dire nombres triangulaires ; voir la figure 4) ; d'un, deux, trois ou quatre carrés ; d'un, deux, trois, quatre ou cinq pentagones ; d'un, deux, trois, quatre ou six hexagones ; d'un, deux, trois ou sept heptagones, et ainsi de suite indéfiniment. (2) Un multiple de 8 diminué d'une unité se compose seulement de quatre carrés, non seulement en entier, mais même en fractions». D'autres sont énoncés en août 1659 dans une lettre à Pierre de Carcavi, un magistrat, à Paris, où Fermat correspondait.

On n'a que deux exemples de démonstrations par descente infinie de la main de Fermat : l'une se trouve en marge d'un problème ajouté par Bachet à la fin du livre VI de Diophante : «Trouver un triangle rectangle dont l'aire soit un nombre donné». Fermat ajoute : «L'aire d'un triangle rectangle en

nombres ne peut être un carré(...) Si l'aire d'un triangle était un carré, il y aurait deux bicarrés dont la différence serait un carré ; il s'ensuit qu'on aurait également deux carrés dont la somme et la différence seraient des carrés(...) Donc si on donne deux carrés dont la somme et la différence sont des carrés, on donne par là même, en nombres entiers, deux carrés jouissant de la même propriété et dont la somme est inférieure. Par le même raisonnement, on a une suite infinie de carrés plus petite que celle déduite de la première, et, en continuant indéfiniment, on trouvera toujours des nombres entiers de plus en plus petits satisfaisants aux mêmes conditions. Mais cela est impossible, puisqu'un nombre entier étant donné, il ne peut y avoir une infinité de nombres entiers qui soient plus petits...»

Traduisons algébriquement le discours de Fermat : pour le triangle rectangle de côtés de l'angle droit $2pq$, $p^2 - q^2$ et d'hypoténuse $p^2 + q^2$, l'aire $pq(p^2 - q^2)$ étant un carré, les nombres p , q , $p^2 - q^2$ sont des carrés, car p et q

pas de facteur commun) et de parités différentes (sinon le facteur 2 serait facteur commun) ; ainsi $p = u^2$, $q = v^2$ et $p^2 - q^2 = u^4 - v^4 = (u^2 + v^2)(u^2 - v^2)$ est un carré, donc $u^2 + v^2 = s^2$ et $u^2 - v^2 = t^2$. On déduit que $s^2 = t^2 + 2v^2$, et que $s = m^2 + 2n^2$, $t = m^2 - 2n^2$, et $v = 2mn$, de sorte que $u^2 = t^2 + v^2 = (m^2)^2 + (2n^2)^2$ et $(2n^2, m^2, u)$ est un nouveau triangle



6. LA MÉTHODE DE LA CORDE, inventée par Newton, fut appliquée à la fin du siècle dernier à des courbes d'équation $y^2 = P(x)$, où P est un polynôme de degré égal à trois. Newton a remarqué qu'une droite qui passe par deux points de coordonnées rationnelles de la courbe passe également par un troisième point rationnel. La méthode de la tangente correspond au cas particulier où deux points sont confondus : la sécante devient une tangente, de sorte qu'un point rationnel en détermine un autre.

rectangle dont l'aire m^2n^2 est un carré ; alors $m^2 = u_1^4 - v_1^4$, avec des nombres u_1, v_1 , tels que $u_1^2 \pm v_1^2$ soit carré, et on voit que $u_1^2 + v_1^2 < u^2 + v^2$. Cette démonstration donne l'impossibilité de l'équation de Fermat pour l'exposant 4.

Dans la correspondance ou dans ses travaux publiés, Fermat n'a jamais fait allusion à son équation pour d'autres exposants que 3 et 4. Il est donc permis de penser qu'il s'est aperçu après coup d'une difficulté dans la démonstration qu'il croyait avoir pour le cas général de sa conjecture.

Les successeurs de Fermat

Pendant le XVII^e siècle, l'analyse diophantienne est restée un sujet à la mode qui a intéressé notamment Isaac Newton et Wilhelm von Leibniz. Au premier, on doit une note remarquable dans un cahier de 1670, où il interprète l'équation diophantienne $y^2 = P(x)$, où P est un polynôme de degré égal à trois (de la forme $ax^3 + bx^2 + cx + d$), comme la recherche des points à coordonnées rationnelles sur une courbe définie par cette équation. Newton explique comment une sécante qui joint deux points rationnels (c'est-à-dire dont l'abscisse et l'ordonnée sont des nombres rationnels) recoupe la courbe en un troisième point rationnel, mais cette interprétation par la géométrie algébrique reste isolée, à l'époque (voir la figure 6).

Leibniz avait découvert que certaines manipulations de l'analyse diophantienne conduisant à exprimer rationnellement, en fonction d'un paramètre, des solutions d'une équation algébrique $f(x, y) = 0$, pouvaient être employées pour obtenir des intégrales de y en fonction de x (l'aire sous la courbe donnée par l'équation $y = f(x)$). On trouve une remarque analogue dans des lettres du mathématicien suisse Daniel Bernoulli (1700-1782) à Christian Goldbach (1690-1764), en décembre 1733.

C'est précisément par Goldbach que l'attention de Peter Lejeune Dirichlet (1773-1830) a été attirée sur les travaux arithmétiques de Fermat, à partir de 1730. Euler a beaucoup étudié le grand théorème de Fermat, et beaucoup de ses travaux sont consacrés à des démonstrations de résultats annoncés par Fermat.

Le premier thème est l'étude des équations diophantiennes de degré

égal à deux. En supposant connue une solution rationnelle, il aborde la recherche des autres solutions d'une manière analogue à celle de Diophante pour le problème 8 du livre II, et il montre que la détermination des solutions entières exige la résolution d'une équation de degré 3 ou 4.

Un deuxième thème est l'étude des équations de la forme $y^2 = P(x)$, où P est un polynôme de degré égal à trois ou quatre et des problèmes apparentés. On peut y rattacher l'impossibilité de l'équation $x^4 + y^4 = z^2$, qu'Euler établit en 1747, par descente infinie, à la manière de Fermat, et dont il tire une série de corollaires.

Les constructions d'Euler relatives à ces équations peuvent s'interpréter géométriquement comme l'avait fait Newton (méthode de la sécante ou de la tangente), mais Euler n'en dit rien. Le lien avec le calcul intégral ne lui avait peut-être pas échappé, car, vers 1780, il transforme l'équation $y^2 = P(x)$ en une autre équation analogue à celle qui donne l'addition des «intégrales elliptiques». Ces intégrales ne peuvent pas être exprimées par des fonctions élémentaires (les quatre opérations, l'exponentielle, le logarithme et les fonctions sinus et cosinus) ; elles sont égales aux aires comprises entre l'axe des abscisses et les courbes de la forme $y = R(\sqrt{P(x)})$, où R est une fonction rationnelle et où P est un polynôme à une variable de degré trois ou quatre.

Euler a donné une démonstration du théorème de Fermat pour l'exposant égal à 3 ; il y fait une première allusion dans une lettre à Goldbach, en août 1753, puis, en 1759, dans un article intitulé «Sur les formes quadratiques $a^2 + 3b^2$ et $m^2 + mn + n^2$: on passe de l'une à l'autre en posant $m = a + b$ et $n = b - a$, et Euler annonce que si t^3 est représenté par la seconde forme, il en est de même de t , ce qui lui permet d'amorcer une démonstration par descente infinie. Il publie un article intitulé «Sur les formes

quadratiques complexes de la forme $a + b\sqrt{-3}$ (où a et b sont des nombres entiers),

en 1770, où il utilise des décompositions en facteurs premiers comme les entiers ordinaires : tout nombre de cette forme se décompose en un produit unique de nombres «premiers» du même type.

Cependant il remarque que l'équation $x^3 + y^3 + z^3 = t^3$ est possible : c'est le problème 16 du livre V de Diophante, qu'il étudie dans un article de 1756. Il

pense qu'une somme de trois bicarrés ne peut être un bicarré, tandis qu'une somme de quatre bicarrés peut être un bicarré. L'équation de Fermat, $x^4 + y^4 + z^4 = u^4$, ne sera résolue qu'en 1911 par le mathématicien américain M. Norrie. Euler croyait que qu'une somme de quatre puis-

sances cinquièmes ne peut pas être une puissance cinquième, mais, en 1962, M. Biron a trouvé un contre-exemple par ordinateur, démontrant ainsi que cette idée était fautive.

Joseph Louis Lagrange (1736-1813) a pris le relais d'Euler pendant la dizaine d'années où il s'est intéressé à la théorie des nombres. Lagrange obtient d'abord un résultat sur la périodicité des fractions continues de nombres quadratiques : les nombres quadratiques sont les racines d'équations du deuxième degré dont les coefficients sont des nombres entiers (par exemple, $\sqrt{3}$ est un nombre quadratique, parce qu'il est racine de l'équation $x^2 - 3 = 0$). On peut écrire ces nombres sous la forme de fractions continues, de la forme générale $1 + 1/(a_0 + 1/(a_1 + 1/(a_2 + 1/(...))))$; notamment $\sqrt{3}$ s'écrit sous la forme $1 + 1/(1 + 1/(2 + 1/(1 + 1/(2...))))$ dont la périodicité est égale à deux : les 1 et les 2 alternent aux dénominateurs successifs.

À partir de ce résultat, Lagrange établit la possibilité de l'équation de Pell-Fermat $x^2 - dy^2 = 1$ (où d est un entier positif) ; il obtient un critère d'existence d'une solution pour les équations diophantienne de degré deux (critère qui sera amélioré par Adrien Marie Legendre). Lagrange n'aborde les équations de degré trois ou quatre que dans un article de 1777, où il utilise, sous une forme exclusivement algébrique, la méthode de la tangente.

L'analyse diophantienne au XIX^e siècle

Au XIX^e siècle, de nouveaux cas de la conjecture de Fermat sont progressivement établis : Peter Dirichlet (1805-1859), qui a été directeur de l'Institut

en 1825 l'impossibilité de l'équation $x^5 \pm y^5 = 2^n$, avec m positif, par une descente infinie fondée sur les propriétés des nombres de la forme $a + b\sqrt{5}$. La même année, Legendre démontre le théorème de Fermat pour l'exposant 5. Puis, en 1832, Dirichlet établit le cas de l'exposant 14 au moyen de l'arithmétique des nombres de la

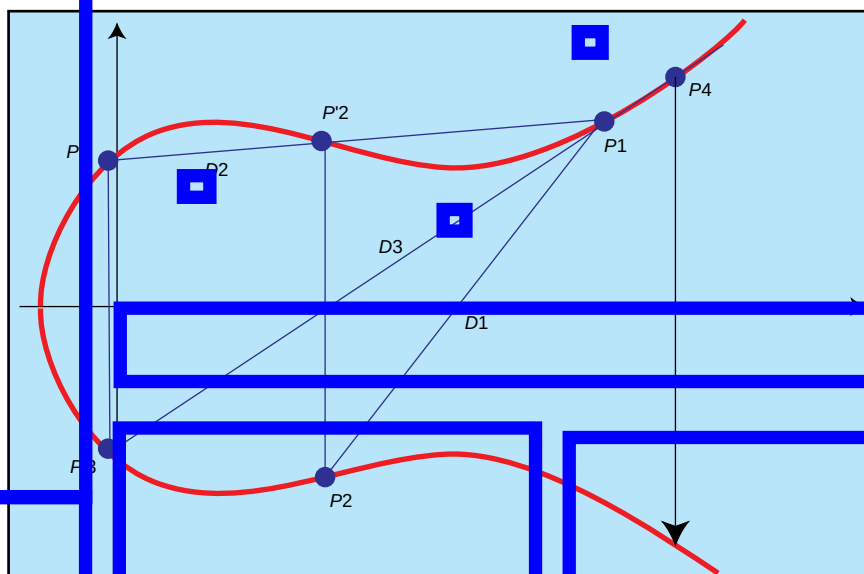
forme $m + n\sqrt{-7}$, où m et n sont nombres entiers, et Gabriel Lamé (1795-1870), en 1839, obtient une démonstration pour l'exposant 7.

Dans les mêmes années, Legendre, Niels Abel (1802-1829) et Sophie Germain (1776-1831) mettent au point des méthodes élémentaires pour atteindre des résultats sur l'impossibilité du premier cas de l'équation de Fermat $x^p + y^p + z^p = 0$, avec p premier impair ne divisant aucun des nombres x, y, z . Sophie Germain démontre que ce cas est impossible s'il existe un nombre premier q tel que p ne soit pas une puissance p -ième modulo q : lorsque $2p + 1$ est premier, p est une puissance p -ième modulo $2p + 1$. (Si $2p + 1 = 23$, on peut prendre $q = 2p + 1$ parce que 11 n'est pas une puissance onzième modulo 23 (tout nombre compris entre 1 et 22, élevé à la puissance 11, est un multiple de 23 augmenté ou diminué de 1). Et Legendre étend ce résultat au cas où $4p + 1$ est premier, p est une puissance p -ième modulo $4p + 1$ (11 est une puissance 11-ième modulo 43 (11¹¹ = 53).

Le premier travail d'Ernst Kummer (1810-1893), en 1837, sur l'équation de Fermat se rattache au même ordre d'idées ; il établit d'abord que si l'équation $x^{2\lambda} + y^{2\lambda} = z^{2\lambda}$ a une solution telle que λ n'ait pas de facteur commun avec le produit xyz , alors λ a un reste égal à 1 dans la division par 8.

Apparemment Kummer a initialement cru qu'il pourrait démontrer le théorème de Fermat pour un exposant λ premier impair quelconque par une méthode de descente infinie, au moyen de l'arithmétique des nombres cyclotomiques engendrés par α , une racine λ -ième de 1», envisagée par Gauss dans la septième section de ses *Disquisitiones arithmeticae* : les nombres cyclotomiques sont les nombres de la forme $a_0 + a_1\alpha + a_2\alpha^2 + \dots + a_{\lambda-2}\alpha^{\lambda-2}$, où les nombres $a_0, a_1, a_2, \dots, a_{\lambda-2}$ sont des nombres entiers, et où α est une racine λ -ième de l'unité, c'est-à-dire un nombre complexe vérifiant l'équation $x^\lambda = 1$; un tel nombre est représentable par un point du cercle de rayon 1 centré à l'origine. On peut alors considérer qu'un nombre cyclotomique trouve entre 1 et α est la λ -ième partie de tout le cercle. Si les entiers cyclotomiques avaient admis une décomposition unique en facteurs premiers, une solution (x, y, z) de l'équation de Fermat pour l'exposant λ , sans facteur commun avec x, y et z , aurait conduit à l'égalité :

$$z^\lambda = (x + y)(x + \alpha y) \dots (x + \alpha^{\lambda-1}y)$$



7. SUITE DE POINTS créée à partir d'une solution P_1 de l'équation associée à la courbe en rouge. P_1 serait une solution dite «de torsion» si l'une des droites D était verticale. Les points de torsion forment des groupes dont on a exploré les relations avec les points rationnels.

un second membre, λ nombres sans facteurs communs ; on aurait déduit que ces facteurs devaient être tous des puissances λ -ièmes, ce qui aurait permis d'amorcer une descente infinie.

Toutefois Kummer découvrit en 1844 que l'arithmétique des entiers cyclotomiques était délicate : il n'existe pas toujours de décomposition unique de ces nombres en facteurs cyclotomiques premiers. Pour se raccrocher à l'arithmétique ordinaire, Kummer introduit la norme des entiers cyclotomiques $f(\alpha) = a_0 + a_1\alpha + a_2\alpha^2 + \dots + a_{\lambda-2}\alpha^{\lambda-2}$: cette norme, définie par le produit $f(\alpha)f(\alpha^2)\dots f(\alpha^{\lambda-1})$, est toujours un nombre entier naturel, et la norme d'un entier cyclotomique premier est un nombre premier ordinaire, c'est-à-dire égal à 1 dans la division entière par λ .

Réciproquement, pour les nombres premiers inférieurs à 1 000, Kummer a laborieusement calculé (à la main, parce qu'il ne disposait alors pas d'ordinateur) des tables de factorisation en entiers cyclotomiques pour les nombres premiers ordi-

naires inférieurs à 1 000, pour tous les nombres λ inférieurs à 24. Il a ainsi découvert que, pour λ égal à 23, le nombre premier ordinaire 47 (deux fois 23 plus 1) n'est pas la norme d'un entier cyclotomique, de sorte que les entiers cyclotomiques engendrés par une racine 23-ième de l'unité n'admettent pas de décomposition unique

en facteurs premiers. Cela a conduit Kummer à élaborer, dans ses travaux suivants, la théorie des «nombres premiers idéaux», qu'il ne définissait d'ailleurs pas comme des nombres : il donnait seulement les conditions pour qu'un entier cyclotomique soit divisible par un nombre premier idéal. En termes modernes, les nombres idéaux de Kummer peuvent s'interpréter comme des fonctions associant un nombre entier naturel à un nombre premier cyclotomique, avec des conditions particulières ; l'exposant de la puissance du nombre idéal qui divise l'entier cyclotomique est précisément cette fonction.

Kummer définit les produits d'idéaux (on les appellera aujourd'hui des diviseurs), qu'il groupe en un nombre fini h de classes. En reprenant des idées de Dirichlet, il étudie ce nombre de classes au moyen d'une fonction analogue à la fonction zêta de Riemann (le produit, sur tous les idéaux premiers, de termes de la forme $1/(1 - n(p)^{-s})$, où $n(p)$ représente la norme de p). La finitude du nombre de classes permet d'écrire les facteurs $x + y\alpha^k$ multipliés par des facteurs ne pouvant

prendre qu'un nombre fini de valeurs. Lorsque λ ne divise pas le nombre de classes, on peut poursuivre la démonstration comme dans le cas où h est égal à 1 (celui de l'arithmétique ordinaire) ; on dit alors que λ est un nombre premier régulier, et Kummer a donné un critère pour reconnaître les nombres

premiers réguliers. Les seuls nombres premiers irréguliers inférieurs à 100 sont 37, 59 et 67.

Analyse diophantienne et géométrie algébrique

Le travail de Newton précédemment évoqué à propos de tangentes et de sécantes (inconnu jusque dans les années 1900) était resté sans suite, mais la connexion de l'analyse diophantienne avec la géométrie algébrique fut citée pour le cas des intégrales elliptiques par Carl Jacobi (1804-1851) dans une courte note publiée en 1834. Jacobi y interprète la méthode d'Euler pour construire des solutions rationnelles de l'équation $y^2 = P(x)$, où P est un polynôme de degré égal à 4, au moyen de la multiplication par un entier de l'intégrale de la fonction $1/\sqrt{P(x)}$.

James Sylvester (1804-1897), à l'Université de Londres, a consacré des travaux remarquables à l'étude des équations diophantiennes de degré égal à 3 par la géométrie algébrique. Il annonce ses résultats dans une note de 1858 et il les développe dans une série de mémoires en 1879 et en 1880. Sa méthode consiste à construire des points rationnels d'une courbe cubique (voir la figure 5) à partir d'un point rationnel donné en se servant de tangentes et de sécantes.

En 1890, le dernier mathématicien capable d'embrasser l'ensemble des mathématiques, David Hilbert (1862-1943), et son professeur Adolf Hurwitz (1859-1919) étudient systématiquement les équations diophantiennes à l'aide de la notion de genre d'une courbe, introduite par Rudolf Clebsch (1833-1872), à la suite de travaux de Bernhard Riemann : on étend la méthode de la corde en remplaçant la sécante (de degré 2) qui coupe la cubique (de degré 3, soit $1 + 2$) par une courbe de degré inférieur de deux unités au degré n de la courbe étudiée et en imposant que cette courbe passe par tous les points singuliers (points doubles, points de rebroussement, etc.). On lui impose en outre de passer par un certain nombre de points ordinaires. Si p est le genre, le nombre de points imposés doit être égal à $n - 2 + p$, et il reste p points d'intersection. Hilbert et Hurwitz se limitent au genre égal à zéro ; ils trouvent que l'on peut passer, par des quotients de polynômes à coefficients rationnels (des « transformations birationnelles »), de courbes de genre

égal à zéro et de degré n définies sur l'ensemble des nombres rationnels à une droite ou à une conique, et inversement. En réduisant ainsi le degré d'une équation diophantienne, ils arrivent au degré 1 ou 2, que l'on sait résoudre.

Puis, en 1901, Henri Poincaré (1854-1942), sans connaître apparemment le travail de Hilbert et de Hurwitz, consacre un article important à l'analyse diophantienne. Poincaré classe les problèmes diophantiens en problèmes équivalents par certaines transformations adaptées à la nature du problème. Comme il s'intéressait à l'analyse diophantienne rationnelle, les transformations birationnelles à coefficients rationnels l'intéressaient particulièrement, et le genre, qui n'est pas modifié au cours de telles transformations (on dit que c'est un invariant birationnel) a une signification que n'a pas le degré. Poincaré traite d'abord des courbes de genre zéro, obtenant le même résultat que Hilbert et Hurwitz, puis il passe au genre un, qui occupe l'essentiel de son mémoire.

Poincaré montre que les courbes de genre un qui ont un point rationnel sont birationnellement équivalentes à la cubique déjà considérée, d'équation $y^2 = 4x^3 - ax - b$. Il introduit les fonctions dites elliptiques afin d'exprimer les coordonnées des points de ces courbes.

Un ensemble de points rationnels d'une cubique plane est dit stable par la construction des tangentes et des sécantes si cette construction ne fait pas sortir du ensemble. Poincaré publie deux articles publiés entre 1906 et 1908, Beppo Levi cherche ces systèmes stables. En termes modernes, il s'agit de déterminer quels sont les groupes de torsion possibles dans le groupe des points rationnels (voir la figure 7). La détermination complète a été faite par Bruno Mazur en 1978, et il est remarquable que Levi s'en soit approchée.

Contrairement à Poincaré, L. Mordell s'intéressait à l'analyse diophantienne entière ; en 1922, il voulait établir la finitude du nombre de solutions entières d'équations diophantiennes de la forme $y^2 = P(x)$, où P est un polynôme de degré trois ou quatre. Pour le degré trois, la théorie des nombres algébriques lui permettait de se ramener à un théorème d'Axel Thue, lié à la théorie des approximations diophantiennes (comment estimer la rapidité de l'approximation d'un nombre irrationnel par une

suite de nombres rationnels), sur la finitude du nombre de solutions entières d'une équation de la forme $F(u,v) = m$, où F est un polynôme homogène en (u,v) , c'est-à-dire dont le degré total, pour u et pour v soit égal pour tous les termes du polynôme (par exemple, le polynôme $uv^3 + u^2v^2 + 4v^4$ est homogène, et de degré égal à quatre) ; mais cette méthode était inopérante en degré quatre.

Mordell s'est aperçu qu'elle lui donnait un ordre d'idées qui lui permettait d'établir que les points rationnels s'obtiennent à partir d'un nombre fini d'entre eux par la construction des tangentes et des sécantes ; c'est alors seulement qu'il cite Poincaré et qu'il formule sa célèbre conjecture, sur la finitude du nombre de points rationnels pour les genres strictement supérieurs à un.

André Weil, en 1929, a réinterprété le résultat de Mordell en termes du groupe des points rationnels d'une courbe elliptique. Cette conjecture de Mordell a fini par être démontrée en 1983, par l'Allemand Gerd Faltings, qui a suivi une autre voie. Comme la courbe de Fermat est de genre supérieur à un lorsque l'exposant est strictement supérieur à trois, le théorème de G. Faltings indique que l'équation de Fermat n'a au plus qu'un nombre fini de solutions.

Le théorème de Fermat proprement dit est sorti de son isolement plus récemment, en 1987, quand on s'est aperçu qu'il était une conséquence de conjectures formulées de manière indépendante.

Notamment un théorème de Kenneth Ribet a montré que le théorème de Fermat est une conséquence d'une conjecture de M. Taniyama et de A. Weil sur les courbes elliptiques ; c'est cette conjecture que A. Wiles vient de démontrer.

Christian HOUZEL est professeur de mathématiques à l'IUFM de Paris.

O. NEUGEBAUER et H. SCHNEIDER, *Mathematical Cuneiform Texts*, New Haven, 1945.

DIOPHANTE, *Les Arithmétiques*, 4 vol. Éditions Allard, Paris, 1981-1984 ; vol. 1 et 2 à paraître.

G. TERJANIAN, *Fermat et l'analyse diophantienne*, *Sém. d'Hist. des Math. de Toulouse* 8, pp. 57-66, 1986.

P. RIBENBOÏM, *13 Lectures on Fermat's Last Theorem*, Berlin, 1979.

Les commentaires du mathématicien

JEAN-PAUL DELAHAYE

Les 92 éléments du Big Bang numérique de John Horton Conway.

Aristote, le plus grand de tous les philosophes, méritait bien qu'on le commente, ce que fit Averroès (parmi bien d'autres) au XII^e siècle. Saint Thomas d'Aquin commenta ce commentaire (qu'il désapprouvait) et il fut lui-même commenté par Étienne Gilson qui lui-même... On trouverait mille autres exemples, en littérature ou en philosophie, de ces jeux infinis de commentaires, chacun s'appuyant sur le précédent *ad infinitum*.

Si le philosophe a toujours plus à dire que son prédécesseur, le mathématicien est plus économe de ses propos et ne profite pas de son commentaire pour étaler ses sentiments intimes sur le monde. Dans son *Dictionnaire des idées reçues*, Gustave Flaubert a soigneusement noté, en face du mot mathématiques : dessèchent le cœur.

Pourtant, nous allons voir que le jeu du commentaire mathématique engendre un monde remarquablement riche... en structures mathématiques.

Prenez un mathématicien (au cœur le plus sec possible) ; donnez-lui le texte

1. L'ART DU COMMENTAIRE NUMÉRIQUE	
1	1
11	11
21	21
1211	1211
312211	312211
13112221	13112221
1113213211	1113213211
31131211131221	31131211131221
13211311123113112211	13211311123113112211
11131221133112132113212221	11131221133112132113212221
3113112221232112111312211312113211	3113112221232112111312211312113211

Partant du nombre 1, on le décrit, cela donne «un "1"», c'est-à-dire 11. On décrit 11, cela donne «deux "1"», c'est-à-dire 21, ce qui se décrit «un "2", un "1"», c'est-à-dire 1211 etc. En poursuivant ainsi seuls les chiffres 1, 2 et 3 sont nécessaires.

numérique le plus élémentaire qu'il soit : «1» ; et demandez-lui son commentaire. Laconique, il répondra : «un "1"» (signifiant : le texte est composé d'un «1»), ce qu'il écrira «1 1».

Demandez-lui de commenter ce commentaire numérique. Avec une remarquable efficacité et sans ostentation, il vous dira «deux "1"», ce qu'il écrira «2 1». Continuez ainsi, vous obtiendrez de lui le commentaire «1 2 1 1», puis «1 1 1 2 2 1», puis «3 1 1 2 2 1», et ainsi de suite...

L'EXPANSION NUMÉRIQUE

Facile à dire, mais quelle est cette suite ? Remarque que la suite de commentaires est valable aussi bien en français qu'en anglais : elle n'a pas besoin d'être traduite d'une langue à l'autre. Cette suite aurait été décrite pour la première fois par l'Allemand M. Hilgemeier dans un article où il en démontrait quelques propriétés élémentaires. Il revient cependant à John Conway — célèbre pour son invention du jeu de la vie — d'avoir traité presque toutes les questions posées par ce jeu des commentaires numériques infinis. Ce qu'il a trouvé est étrange, complexe et fascinant.

Pour présenter ses résultats, J. Conway proposa d'utiliser le langage de la chimie, de la physique et de la cosmologie. Il imagina un monde qui, seconde après seconde, n'est que le développement des commentaires numériques successifs du texte «1». Cette vision parménidienne du monde comme devenir de l'UN, aurait sans doute plu à Platon. Le Big Bang numérique de Conway, c'est l'expansion infinie de la suite : «1», «1 1», «2 1», «1 2 1 1», «1 1 1 2 2 1», «3 1 1 2 2 1», «1 3 1 1 2 2 2 1», «1 1 1 3 2 1 3 2 1 1», «3 1 1 3 1 2 1 1 1 3 1 2 2 1», etc.

Le terme d'expansion n'est pas abusif, car J. Conway a établi que le taux d'augmentation moyen de cet univers est 1,30357726903... D'un terme à l'autre, la taille de l'univers est multipliée par ce nombre, solution d'une équation de degré 71, que J. Conway, aidé d'Oliver Atkin, a



LES ÉLÉMENTS

01	H	22
02	He	13112 21 3 2 2 1322112211213322112
03	Li	31221 32 2 2 2 21121123222112
04	Be	11131 21 3 2 2 13221133211322
		11221 21 3 2 2 12
05	B	13211 21 2 2 1 3222122211211233222112
06	C	31131 22 1 3 2 112211213322112
07	N	11131 21 2 2 1 21123222112
08	O	13211 21 2 3 22112
09	F	31121 23 2 2 1 2
10	Ne	11121 32 1 2 2
11	Na	12322 11 2
12	Mg	31132 21 2
13	Al	11132 21 2
14	Si	13221 2 2
15	P	31131 22 1 2 2
16	S	11131 21 2 2
17	Cl	13211 2
18	Ar	3112 2
19	K	1112 2
20	Ca	12
21	Sc	31131 22 1 3 112
22	Ti	11131 21 3 1 1 2
23	V	13211 12
24	Cr	31132 2
25	Mn	11131 22 1 2
26	Fe	13122 12
27	Co	32112 2
28	Ni	11133 12
29	Cu	31111 2
30	Zn	312
31	Ga	13221 33 2 2 1332
32	Ge	31131 22 1 3 1122113222
33	As	11131 21 3 2 1322113322112
34	Se	13211 22 1 3222112
35	Br	11131 21 3 2 112
36	Kr	11131 21 2 2 1 2
37	Rb	13211 21 2
38	Sr	31121 2 2
39	Y	11121 3
40	Zr	12322 11 3 2 2113112211
41	Nb	11131 21 3 2 113111221131221
42	Mo	13211 22 1 3 2113211
43	Tc	31132 11 3 2 2 21
44	Ru	13221 33 2 2 13112211
45	Rh	31131 22 1 3 11221131221
46	Pd	11131 21 3 2 13211
47	Ag	13211 21 2 2 1
48	Cd	31131 22 1 2
49	In	11131 21 2
50	Sn	13211 2
51	Sb	31122 1
52	Te	13221 33 2 2 1
53	I	31131 22 1 3 11221
54	Xe	11131 21 3 2 2 1
55	Cs	13211 21 2
56	Ba	31131 2
57	La	11131 2
58	Ce	13211 31 2
59	Pr	31131 12 2
60	Nd	11131 2
61	Pm	132
62	Sm	31133 2
63	Eu	11132 2
64	Gd	13221 33112
65	Tb	31131 2221131112
66	Dy	11131 211312
67	Ho	13211 2
68	Er	31131 222
69	Tm	11131 21133112
70	Yb	13211 1112
71	Lu	31131 2
72	Hf	11132 2
73	Ta	13112 2113321132211211213322113
74	W	31221 322212221121123222113
75	Re	11131 211312113221133211322112211 21332 113
76	Os	13211 2122211322212221121123222113
77	Ir	31131 2211322112211213322113
78	Pt	11131 2
79	Au	132112211213322113
80	Hg	31121123222113
81	Tl	111213222113
82	Pb	123 2113
83	Bi	311322113
84	Po	1113222113
85	At	1322113
86	Rn	311311222113
87	Fr	1113122113
88	Ra	132113
89	Ac	3113
90	Th	1113
91	Pa	13
92	U	3

écrite explicitement. Cela signifie que le commentaire numérique d'un texte augmente sa taille de 30 pour cent en moyenne à chaque étape (ce résultat est vrai quel que soit le point de départ, sauf pour le noyau «2 2» qui, bien sûr, reste fixe). Dans cette cosmologie arithmétique, nous savons donc – contrairement à la cosmologie du monde physique où cette question reste ouverte – que l'expansion ne cessera jamais (en particulier, il n'y a pas de cycle fini autre que 2 2). Les remarquables peut-être que, comme en littérature, le commentateur au fil des siècles voit son travail s'alourdir, devenir de plus en plus compliqué sans qu'il y ait aucune limite, et cela bien que le point de départ soit simplement un unique «1».

L'analogie avec le monde physique proposée par J. Conway est plus profonde encore. L'univers engendré par les commentaires numériques sur l'UN se décompose en éléments stables et en éléments instables, et il y a 92 éléments stables que J. Conway a baptisés du nom des 92 premiers éléments de la classification périodique des éléments chimiques de Mendeleïev. Les transformations des éléments numériques correspondent, sans être exactement les mêmes, aux transmutations spontanées des éléments physiques.

LA CHIMIE DU BIG BANG NUMÉRIQUE

Définissons d'abord ce qu'est un élément. Certains nombres N sont une concaténation de deux morceaux $G.D$ qui, dans la suite des commentaires numériques, n'interfèrent plus jamais entre eux. $G.D$ est une décomposition du nombre N si, pour tout entier n , le n ième commentaire de N est obtenu en juxtaposant le n ième commentaire de G et le n ième commentaire de D .

Le nombre 1113213211, par exemple, se décompose en $G = 11132$ et $D = 13211$. En effet, les commentaires successifs de 11132 se termineront tous par 2 (réfléchissez une seconde pour vous en persuader), alors qu'aucun commentaire de 13211 ne commencera par 2 (car 13211 $\rightarrow$ 1131221 $\rightarrow$ 3113112211 $\rightarrow$ 13211 21321 dont le début est 13211, et donc les premières décimales recommencent de manière cyclique).

Les nombres qui ne peuvent pas être décomposés sont appelés les éléments, ou atomes. Il faut faire attention : ce n'est pas parce qu'un élément apparaît dans un nombre que le nombre se décompose exactement à cet endroit, car il faut que les découpes soient bonnes : le tableau 4, sur le théorème de la coupure et les éléments, donne la liste de

3. LES TRANS MUTATIONS

01	H	→	H
02	He	→	Hf Pa H Ca
03	Li	→	He
04	Be	→	Ge Ca Li
05	B	→	Be
06	C	→	B
07	N	→	C
08	O	→	N
09	F	→	O
		→	F
11	N	→	Ne
12	M	→	Pm Na
13	Al	→	Mg
14	Si	→	Al
15	P	→	Ho Si
16	S	→	P
17	Cl	→	S
18	Ar	→	Cl
19	K	→	Ar
20	Ca	→	K
21	Sc	→	Ho Pa H Ca Co
22	Ti	→	Sc
23	V	→	Ti
24	Cr	→	V
25	Mn	→	Cr Si
26	Fe	→	Mn
27	Co	→	Fe
28	Ni	→	Zn Co
29	Cu	→	Ni
30	Zn	→	Cu
31	Ga	→	Eu Ca Ac H Ca Zn
32	Ge	→	Ho Ca
33	As	→	Ge Na
34	Se	→	As
35	Br	→	Se
		→	Br
37	Rb	→	Kr
38	Sr	→	Rb
39	Y	→	SrU
40	Zr	→	Y H Ca Tc
41	Nb	→	Er Zr
42	Mo	→	Nb
43	Tc	→	Mo
44	Ru	→	Eu Ca Tc
45	Rh	→	Ho Ru
46	Pd	→	Rh
47	Ag	→	Pd
48	Cd	→	Ag
49	In	→	Cd
50	Sn	→	In
51	Sb	→	Pm Sn
52	Te	→	Eu Ca Sb
53	I	→	Ho Te
54	Xe	→	I
55	Cs	→	Xe
56	Ba	→	Cs
57	La	→	Ba
58	Ce	→	La H Ca Co
59	Pr	→	Ce
60	Nd	→	Pr
61	Pm	→	Nd
62	Sm	→	Pm Ca Zn
63	Eu	→	Sm
64	Gd	→	Eu Ca Co
65	Tb	→	Ho Gd
66	Dy	→	Tb
67	Ho	→	Dy
68	Er	→	Ho Pm
69	Tm	→	Er Ca Co
70	Yb	→	Tm
71	Lu	→	Yb
72	Hf	→	Lu
73	Ta	→	Hf Pa H Ca V
74	W	→	Ta
75	Re	→	Ge Ca W
76	Os	→	Re
77	Ir	→	Os
78	Pt	→	Ir
		→	Pt
80	Hg	→	Au
81	Tl	→	Hg
82	Pb	→	Tl
83	Bi	→	Pm Pb
84	Po	→	Bi
85	At	→	Po
86	Rn	→	Ho At
87	Fr	→	Rn
88	Ra	→	Fr
89	Ac	→	Ra
90	Th	→	Ac
91	Pa	→	Th
92	U	→	Pa

4. LE THÉORÈME DE LA COUPURE ET LES ÉLÉMENTS

Certains nombres se décomposent en deux parties qui n'interfèrent plus jamais dans la suite des commentaires successifs. Ainsi 1113213211 se décompose en 11132 et 13211.

Le résultat suivant, obtenu par John Horton Conway, indique tous les endroits où l'on peut faire de telles coupures :

Si le nombre a se termine par un 2 et que b commence par 121, 123, 131, 132, 111, 112, 313, 321, 323, 3112, 3113, 3221 ou 3223, alors le nombre ab peut être coupé en a et b .

Si le nombre a se termine par un 1 ou un 2 et que b commence par 22121, 22123, 22131, 22132, 22111, 22312, 22313, 22321, 22323, 223112, 223113, 223221, ou 223223, alors le nombre ab peut être coupé en a et b .

Les nombres qui ne peuvent plus être coupés s'appellent des éléments.

En étudiant soigneusement ce qui se passe à partir de 1, on voit que les 7 premiers nombres de la suite sont des éléments qui ne réapparaissent plus ensuite (ce sont des éléments instables), et qu'il y a 92 éléments stables qui persistent indéfiniment.

Les éléments stables suffisent toujours dans la suite du développement des commentaires sur l'UN. Quand on connaît leur comportement, on sait décrire

L'évolution de l'Univers à partir d'un certain moment n'est donc que la transformation des éléments stables les uns en les autres, selon des règles immuables (détalées sur le tableau 3). Une sorte de bouillonnement complexe, mais parfaitement réglé, détermine l'avenir des commentaires infinis sur l'UN.

La démonstration de ce premier résultat consiste simplement en la vérification des tableaux et en quelques raisonnements arithmétiques. Il ouvre cependant la porte, cette fois en utilisant des méthodes d'algèbre matricielle (triangulation de matrice, calcul de valeurs propres et de vecteurs propres), à la démonstration d'un second résultat que J. Conway appelle le Théorème arithmétique, qui indique des propriétés statistiques de l'évolution des commentaires sur l'UN.

Ce théorème, déjà évoqué, indique que la taille de l'univers augmente exponentiellement à une vitesse égale à 1,30357726903..., et que l'abondance des différents éléments tend vers certaines valeurs fixées non nulles.

Pour un million d'atomes, il y a par exemple, en moyenne, 91 790 atomes d'hydrogène, 27 d'arsenic, 102 d'uranium, 3 237 d'hélium.

Que se passe-t-il lorsque l'on part d'un nombre autre que «1»? Quelques éléments supplémentaires apparaissent – J. Conway les dénomme transuiriens – qui restent présents indéfiniment, mais leur taux d'abondance tend vers zéro et donc seuls les 92 éléments restent présents avec des taux non négligeables (les mêmes que précédemment) ; l'expansion se fait encore exponentiellement, avec le même taux, donnant un accroissement de 30,35 pour cent en moyenne à chaque étape.

Cette fois, Conway n'a pas pu détailler la démonstration, car, dit-il, elle est astronomiquement difficile et nécessite plusieurs dizaines de pages. Il attend qu'on lui en propose une solution simplifiée.

LES COMMENTAIRES CYCLIQUES

Récemment, sans connaître les résultats de J. Conway, Bernard Germain-Bonne, de l'Université de Lille, s'est posé une question nouvelle sur les suites de commentaires numériques.

Existe-t-il des suites numériques infinies qui, lorsqu'on en fait le commentaire, soient égales à elles-mêmes? Une telle suite serait son propre commentaire, comme, dans le cas fini, le nombre 22 est son propre commentaire (22 est la seule suite finie qui soit égale à son commentaire).

toutes les bornes de coupures. J. Conway a montré que parmi tous les éléments, il n'y en a que 92 (voir le tableau 2) qui restent présents dans l'univers au cours de son évolution. Le Théorème chimique de J. Conway énonce qu'à partir d'un

certain moment l'univers n'est composé que des 92 éléments (les éléments stables) et qu'à partir de ce moment (pour chaque nombre engendré à partir du 1), les 92 éléments stables sont présents dans l'Univers.

5. LES CYCLES DE BERNARD GERMAIN-BONNE

Voici les 500 premiers chiffres de trois nombres infinis qui sont le commentaire du commentaire du commentaire d'eux-mêmes. Le nombre a a pour commentaire b qui a pour commentaire c qui a pour commentaire a .

$$a = f(f(f(a))) =$$

3123211231 32132211231131122211331121321232221123113112221131112311322311211
1311222112 32113311213211221121332211231131122211311123113321112131221123113
1122211322 11311222112111312211311123113322112132113212231121113112221121321
1321222113 22122211211232221123113112221131112311332111213122112311311123112
1113311211 31221121321131211132221123113112221131112311332211322311311222113
1112311332 1121113122113121113221112131221131112311211232221121321132132
2113312211 231131122211211131221131112311321

$$f(a) = b = f(f(b)) =$$

1311121312 11213211312111322211213211321322123211211131211121332211213211321
3221133112 32113221321123113213221121113122123211211131221222112112322211213
2113213221 33112132123123112111311222112132113213221132213211321322112311311
2221133112 32123222112111312211312112213211231132132211211131221131211322113
3211322112 11213322112132113213221133112132123123112111311222112132113311213
2112312321 123113112221121113122113111231133221121321132132211331121321232221
1322132113 132211331121321232221123113112221

$$f(f(a)) = c = f(f(f(a))) =$$

1113311211131122211211131221131112311332211211131221131211132211121312211231
1311123112112322211211131221131211132221232112111312211322111312211213211312
111322211231121112131221123113112211322112211213322112111312211312111322
21232112 11211121311121321123113213221121113122113121113222113221113122113
1211132221121321132132212321121113121112133221123113112221131112212211131221
1213211312111322211231131122211311122113222123122113222122211211232221121113
12211312111322212321121113121112131112132112

Bernard Germain-Bonne a démontré qu'il n'y avait que 4 cycles de longueur 3 et qu'il n'y avait aucun cycle d'une autre longueur.

B. Germain-Bonne a répondu non, mais il s'est alors posé la question de savoir s'il pouvait exister des suites numériques infinies (des nombres infinis, en quelque sorte) qui se commentent cycliquement les unes les autres : dans un cycle de période 3, la première serait le commentaire de la deuxième, qui serait le commentaire de la troisième qui serait le commentaire de la première.

L'étude minutieuse qu'il a menée (et qui l'a conduit, lui aussi, à développer une théorie des éléments analogue à celle de J. Conway) a donné la réponse suivante :

Seuls ces cycles à trois éléments sont possibles, et il y a en quatre en tout et pour tout. On les obtient par la méthode suivante :

– On part de l'élément Zn, égal à 312 ;

– On calcule le commentaire à trois reprises ; cela donne Cu, puis Ni, puis Zn Co = 31232112, ce qui prolonge le mot de départ ;

– On calcule encore le commentaire trois fois ; cela donne Cu Fe, puis Ni Mn, puis Zn Co Cr Si, soit 3123211231121322112, ce qui prolonge encore le mot de départ. Etc.

De proche en proche, on obtient une infinité de chiffres qui composent un mot infini qui est «le commentaire du commentaire du commentaire de lui-même».

Le second cycle est obtenu de la même façon en partant de Ho ; son début est Ho Gd Mn Ca Zn Ar Mn. Le troisième et le quatrième sont obtenus en faisant précéder les deux premiers de H = 22.

Ces nombres infinis, qui sont exactement égaux au commentaire du commentaire du commentaire d'eux-mêmes, ne sont pas périodiques (jamais les mêmes chiffres ne se répètent dans le même ordre). Leurs décimales représentent donc des nombres irrationnels nouveaux et remarquables. Ils utilisent évidemment les 92 éléments de la chimie du monde numérique de J. Conway, et cela dans des proportions qui sont celles déjà calculées précédemment par J. Conway. Ces nombres infinis sont des mondes complets, stabilisés, autonomes, qu'on se connaît parfaitement et qui contiennent en eux-mêmes tous les commentaires (numériques) qu'on peut faire sur eux.

LES COMMENTAIRES ORDONNÉS SONT TOUJOURS CYCLIQUES

Les commentaires que nous avons envisagés jusqu'à présent sont des commentaires exhaustifs : à partir du commentaire, il est possible de recons-

tituer le texte original. En littérature, ce n'est en général pas le cas.

Changeons un peu les règles du jeu du commentaire numérique et écrivons le commentaire d'une suite de nombres, par exemple (9 3 1 2 1 9), en comptant le nombre de «0» s'il y en a, puis le nombre de «1» s'il y en a, etc., et écrivons dans cet ordre les résultats. Ici on obtient (2 1 1 2 1 3 2 9), qui lui-même peut se commenter en (3 1 3 2 1 3 1 9), etc. Que se passe-t-il alors ? Y a-t-il encore expansion infinie pour ce nouveau type de commentaire simplificateur ?

Le problème semble proche du précédent mais en réalité il est bien plus simple. Hervé Lehning et, indépendamment, Victor Bronstein et Aviezri Fraenkel ont montré que, quel que soit le point de départ, une telle suite finissait toujours par donner un cycle : ces commentaires ordonnés sont donc toujours cycliques et ne donnent jamais lieu à une croissance infinie.

La suite (1) donne par exemple :

(1) (1 1) (2 1) (1 1 1 2) (3 1 1 2) (2 1 1 2 1 3) (3 1 2 2 1 3) (2 1 2 2 2 3) (1 1 4 2 1 3) (3 1 2 2 1 3 1 4) (4 1 1 2 2 3 1 4) (3 1 2 2 1 3 2 4) (2 1 3 2 2 3 1 4) (2 1 3 2 2 3 1 4)

Ce qui est même mieux qu'un cycle, puisqu'il s'agit d'un point fixe.

La suite partant de (6 7) donne rapidement un cycle d'ordre 2. Ce n'est pas un hasard, car Hervé Lehning a montré que seuls 2 et 3 pouvaient être des périodes. Mais, aussi puissant que soit ce résultat sur les cycles, il ne résout pas toutes les questions qui se posent, et je ne sais pas si quelqu'un a réussi à caractériser tous les points fixes, comme (2 1 3 2 2 3 1 4).

Jean-Paul DELAHAYE est professeur d'informatique à l'Université des sciences et technologies de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille du CNRS.

V. BRONSTEIN et **A. FRAENKEL**, *On a Curious Property of Counting Sequences*, in *American Mathematical Monthly*, pp. 560-563, juin 1994.

J. CONWAY, *The Weird and Wonderful Chemistry of Audioactive Decay*, in *Open Problems in Communication and Computation* (1st Cover Ed.), Springer-Verlag, pp. 170-188, 1987.

M. HILGEMEIR, *Die Gleichniszahlen-Reihe*, in *Blatt der Wissenschaft*, n° 12, pp. 194-195, 1986.

H. LEHNING, *Quelle est la meilleure preuve ?*, in *Quadrature*, n° 11, pp. 5-12, 1992.

B. GERMAIN-BONNE, *Mots autodescriptifs et co-descriptifs*, Publication du Laboratoire d'analyse numérique de l'Université de Lille, n° 332, 1994.

Le principe anthropomurphyque

IAN STEWART

L'explication mécanique montre pourquoi la tartine tombe côté beurre.

Aussi loin que j'examine
Je n'ai jamais eu le bonheur
De voir tomber une tartine
Autrement que côté beurre

Ce texte est une traduction très libre d'un quatrain de James Payn. Ce que Payn déplore n'est que l'exemple archétypique de la loi de Murphy : « toute catastrophe qui peut se produire se produit. » Un capitaine de l'U.S. Air Force – pas de récompense à qui trouvera son nom – la découvrit à la fin des années 1940. Cette loi a de nombreuses variantes et extensions. Par exemple : « Si un malheur est impossible, il se produit quand même. » La prédiction apparaît sous d'autres appellations. En 1991, la série télévisée *QED*, de la BBC, fut à deux pixels de la réfuter.

Les participants de l'émission lancèrent des tartines en l'air 300 fois dans diverses conditions et conclurent qu'il n'y avait aucune prédilection pour les atterrissages côté beurre. En vérité, les résultats étaient statistiquement indiscernables du simple hasard. L'affaire en serait restée là sans Robert Matthews, un journaliste britannique à penchant mathématique. Dans l'*European Journal of Physics*, il a récemment publié deux critiques concernant les expériences de *QED*. D'abord la loi de Murphy devrait, par sa définition même, invalider toute expérience visant à l'établir. Ensuite les tartines sont rarement jetées en l'air lors d'un petit déjeuner, mais plutôt basculées par-dessus le bord de la table. Les expériences de *QED* auraient dû reproduire ce type de mouvements.

Avant d'aller plus loin, il importe de noter que le poids du beurre ne dépasse pas plus de dix pour cent du poids de la tartine type. La plus grande partie de cette masse additionnelle est absorbée par la mie, de sorte que le tartinage a peu d'effets sur la dynamique des tartines volantes. Les effets sur l'aérodynamisme, résultant de la surface beurrée, sont également négligeables. Dès lors, R. Matthews réduit la loi de Murphy aux conséquences d'une asymétrie : comme c'est la face supérieure de la tartine qui est beurrée, cette face est sur le dessus lorsque la tartine bascule par-dessus le bord de la table.

Lors de sa chute, elle pivote avec une vitesse angulaire déterminée par le surplomb de son centre de gravité par rapport au bord de la table à l'instant où la tartine commence sa chute. Se pourrait-il que la hauteur moyenne d'une table et la force de gravitation de la Terre conspirent à créer une prédominance de rotations d'un multiple impair de 180 degrés ? Pour faire court, et d'après les calculs de R. Matthews, ce serait le cas : les rotations qui s'achèvent par un atterrissage côté beurre sont de loin les plus communes.

Avant de considérer les raisons justifiant cette navrante prédominance, résu-

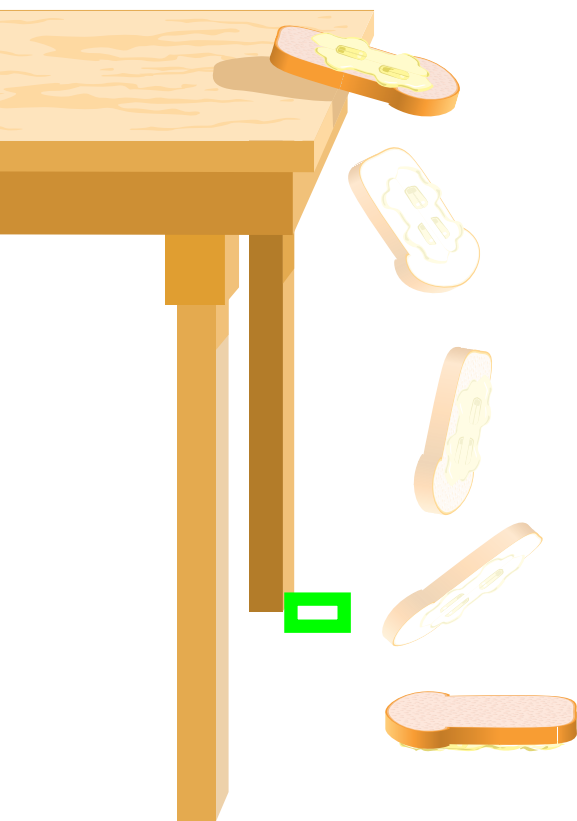
mons les arguments mathématiques de R. Matthews. L'illustration de l'encadré page 105 en haut représente la position initiale de la tartine, les principales variables en jeu, ainsi que quelques formules dérivées des lois de Newton. La conclusion principale est que la tartine ne saurait atterrir « beurre en haut », à moins que le paramètre de surplomb critique – le quotient, de la distance entre le centre de la tartine et le bord de la table, par sa demi-longueur – ne soit au moins de six pour cent. L'expérience prouve que cette valeur est de 2,5 pour cent pour le pain et de 1,5 pour cent pour les toasts, résultats beaucoup trop petits pour que la tartine pivote de plus de 360 degrés. Comme on peut prouver que la rotation est d'au moins 180 degrés, un atterrissage « beurre-en-bas » est inévitable !

R. Matthews fait plusieurs hypothèses, l'une étant que la tartine ne rebondit pas lorsqu'elle heurte le sol. Une autre est que la tartine glisse lentement par dessus le bord de la table, de sorte qu'elle se détache dès que le surplomb critique est atteint ; à encore, pas de véritable difficulté : sauf si la vitesse horizontale de la tartine, lorsqu'elle passe le bord, est au moins de 1,6 mètre par seconde – une sérieuse talochette – cette vitesse est sans grand effet sur la chute. Aussi, si vous voyez une tartine glisser de votre table, donnez-lui de la vitesse en la frappant d'un revers de main. Si cette stratégie ne sauve pas la tartine, elle devrait éviter de heurter le tapis.

LA RÉSONANCE MURPHYQUE

Cette analyse est excellente, mais elle suggère que la loi de Murphy n'est qu'une simple coïncidence, un cas étrange de « résonance murphyque » résultant des valeurs arbitraires que la culture humaine assigne aux tables et tartines et avec la non moins arbitraire valeur du champ gravitationnel terrestre. En fait, comme R. Matthews le démontre, rien n'est plus loin de la vérité. La loi de Murphy, telle que contenue dans les tartines pivotantes, est une profonde conséquence des valeurs des constantes fondamentales de la nature. Dans tout univers contenant des créatures qui nous ressemblent, la loi de Murphy s'applique – du moins s'ils mangent des tartines, assis à des tables.

Le raisonnement complet est technique et compliqué, mais ses grandes lignes sont simples. L'information clef vient de William Press, de Harvard, qui avança en 1980 que la hauteur d'un organisme marchant sur deux jambes est limitée par la valeur du champ de gravitation où il vit. Comparés aux quadrupèdes, les bipèdes sont intrinsèquement instables. Il suffit



La morphodynamique de la tartine

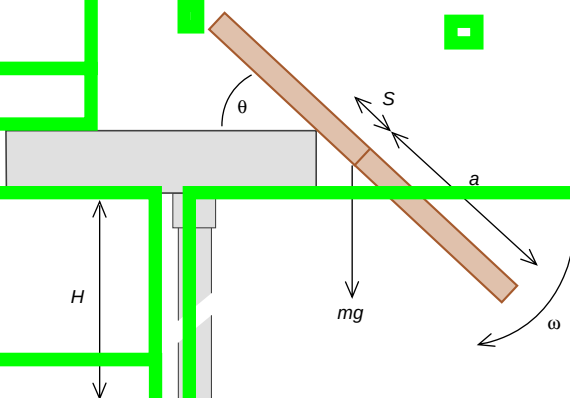
Définissons le paramètre «surplomb critique» – le quotient de la distance de la tartine entre son centre et le bord de la table à sa demi-longueur, juste avant qu'elle se détache – et notons-le η . Les lois de Newton du mouvement conduisent à la relation :

$\omega^2 = (6g/a)(\eta/(1+3\eta^2))\sin\theta$, aussi longtemps que la tartine pivote sur le rebord de la table. La tartine commence à glisser lorsque son poids dépasse la force de friction sur le bord de la table. La vitesse de rotation à cet instant est celle que la tartine conservera tout au long de sa chute.

Les estimations montrent que la tartine va pivoter d'au

moins 180° avant d'atteindre le sol. Pour atterrir «heureux en haut», elle doit tourner d'au moins 360°. Nous connaissons la vitesse de rotation de la tartine et H et g nous indiquent le temps qu'elle mettra pour atteindre le sol. R. Matthews ignore qu'elle ne tourne de plus de 360° que lorsque le

surplomb critique dépasse 0,06, ce qui est rarissime.



g = accélération de la pesanteur
 m = masse de la tartine
 a = demi-longueur de la tartine
 s = surplomb initial
 θ = angle de rotation
 H = hauteur de la table
 ω = vitesse angulaire de rotation

que la verticale de leur centre de gravité soit extérieure à la surface de sustentation pour qu'ils basculent. Les quadrupèdes aussi, mais leur polygone de sustentation est plus grand : les girafes sont plus grandes que les humains.

La hauteur maximale pour un bipède est celle au-delà de laquelle une chute sur la tête causerait sa mort. Il est raisonnable de supposer qu'une table utilisée par un tel bipède intelligent doit avoir une hauteur proche de la moitié de sa propre hauteur. Sur la Terre, une table doit avoir au moins trois mètres de haut pour que la loi de Murphy soit violée, et donc nous devrions mesurer au moins six mètres pour espérer échapper aux infortunes de la résonance murphyque. Une bonne question est : une race extraterrestre lointaine peut-elle être murphyquement immune ?

Pour répondre à cela, R. Matthews modélise un extraterrestre par un cylindre de polymère surmonté d'une sphère en guise de tête. Je propose d'appeler cet organisme un polymurphe. La mort se pro-

duit lorsque les liens chimiques d'une couche du polymère sont brisés. R. Matthews en a déduit que la hauteur d'un polymurphe viable est au plus de $(3nq/f)^{1/2} \mu^2 A^{-1/6} (\omega_0 \epsilon_0)^{1/4} a_0$, expression où n est le nombre d'atomes dans le plan où les fractures doivent se produire (typiquement : environ 100) ; $q = 3 \cdot 10^{-3}$, une constante liée aux polymères ; f , la fraction d'énergie cinétique absorbée par la rupture des liens du polymère ; μ , le rayon des atomes du polymère exprimé en rayons de Bohr ; A , la masse atomique du polymère ; ϵ_0 la constante de structure fine électronique ; e ($2\pi\hbar c$), où e est la charge de l'électron, $\hbar$, la constante de Planck, ϵ_0 , la permittivité de l'espace libre et c la vitesse de la lumière ; α_G , la constante de structure fine gravitationnelle ; G est la constante de la gravitation et m_p la masse du proton ; a_0 est le rayon de Bohr.

En reportant les valeurs de ces variables dans notre Univers, nous trouvons que la hauteur de sécurité maximale pour un polymurphe est de 295 centimètres

(le plus grand être humain mesuré, un certain Roger Wadlow, atteignait 272 centimètres). C'est très en deçà des six mètres requis pour espérer éviter les atterrissages «côté beurre». Il est intéressant de noter que cette limite supérieure aux tailles des polymurphes ne dépend pas de la planète qu'ils habitent. La raison en est que l'équilibre entre les forces de gravitation, les forces électrostatiques et les forces quantiques requises pour empêcher le polymurphe de tomber en morceaux relie la gravité de la planète à des constantes plus fondamentales. Il en résulte donc que la loi de Murphy n'est pas du tout une coïncidence, mais la conséquence d'un principe «anthropomurphyque» : tout univers de type conventionnel contenant des polymurphes intelligents obéira à la loi de Murphy. R. Matthews conclut «si l'on accepte Einstein, Dieu est subtil, mais Il n'est pas malicieux. C'est sans doute vrai, mais Son influence sur la chute des tartines laisse planer le doute.» Le problème du mal est posé.

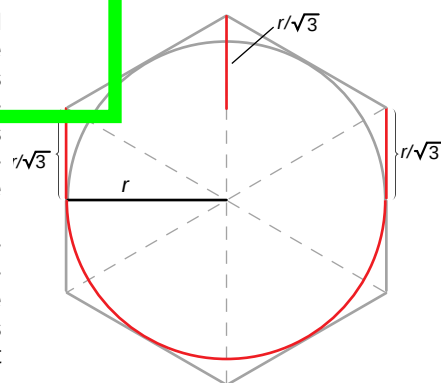
Réaction

Plusieurs lecteurs m'ont écrit pour faire remarquer que Sherlock Holmes aurait pu économiser encore plus de temps dans sa recherche de la chèvre de Ghastleigh (*Un drain peut en cacher un autre, Pour la Science* n° 216) en creusant des fossés sinueux. Geoffrey Phillips de Briarcliff Manor, N.Y., le précise éloquemment.

«La question n'est pas de trouver la tranchée unique la plus courte, mais de minimiser le travail de terrassement. Au lieu de creuser sur les dis-

tances AB et CD – soit 200 mètres –, il suffit de se limiter à 57,75 mètres de B vers A , à la même distance de C vers D et de creuser à cette distance à mi-chemin entre les deux premières, mais plus éloignée du centre ; un creusement total de $(\sqrt{3} + \pi)r$ si on adjoint le demi-cercle.

Ma solution conduisait à une tranchée de $(2 + \pi)r$. L'approche de G. Phillips ouvre tout un nouvel ensemble de questions. En particulier : pouvez-vous faire mieux avec deux tranchées ? Et avec trois ou plus ?



Le patient parasite de la mante religieuse

Texte et photographies de Bernard Chaubet.



Mantibaria mantis fixée sous les ailes de la mante.



Ponte de *Mantibaria mantis* dans l'oothèque en formation.

Les phénomènes de parasitisme étonnent par la finesse des adaptations du parasite à l'hôte. Le talon d'Achille de la mante religieuse (*Mantis religiosa*), redoutable prédateur, est sa progéniture, malgré le soin qu'elle met à la protéger. La femelle pond ses œufs dans une oothèque qu'elle confectionne en sécrétant une matière liquide qui durcit au contact de l'air (à droite). Toutefois, cette coque protectrice ne sèche pas assez vite pour mettre les œufs de la mante à l'abri de tout danger, car certains hyménoptères parviennent à pondre dans les œufs après l'enrobage !

L'un de ces parasites, *Mantibaria mantis*, a une stratégie toute de patience. La femelle, mesurant 2,5 millimètres, part à la recherche d'une mante adulte et s'installe à l'abri, sous les ailes de l'insecte géant (en haut à gauche). Commence alors pour le passager clandestin une vie sédentaire qui va durer plusieurs mois. Ses ailes désormais inutiles se détachent.

Cette attente opiniâtre cesse dès les premières contractions abdominales de la mante sur le point de pondre. L'hyménoptère descend alors le long de son hôte et accède à la matière enrobant les œufs, encore semi-liquide (en bas à gauche). Elle dispose d'une à deux heures pour pondre avant le durcissement de l'oothèque. Au risque d'être engloutie, elle traîne son abdomen jusqu'à ce qu'elle découvre un œuf, puis y dépose le sien. La larve de *Mantibaria* se développera jusqu'au stade adulte aux dépens de l'œuf de mante. Plusieurs œufs sont parasités.

Le parasite court le risque d'être emprisonné dans l'enrobage, car les mouvements de l'abdomen de la mante sont amples et saccadés. S'il survit à cette entreprise, il remontera le long du corps de son hôte et retournera s'abriter... dans l'attente d'une nouvelle ponte.



Histoire des sciences

La défaite de Platon ou la science du xx^e siècle

Claude Allègre. Editions Payard, 1995.

Le livre a un double objet : c'est un voyage à grandes enjambées à travers les progrès de la science, du début du xix^e siècle à aujourd'hui, et c'est une critique alarmée de l'enseignement des sciences, du collège à l'université.

Le sural est envoutant. Si les choix sont caractéristiques des intérêts de l'auteur, cette partialité est positive : les thèmes illustrent le point de vue d'un acteur de la science sur les contributions des différentes disciplines à la dynamique actuelle, sur les spécificités des créateurs, sur leur opportunisme inventif. Ce cri de personnel est, aux yeux du lecteur, plus légitime et plus intéressant qu'une neutralité encyclopédique.

Pour qui ne connaît pas les sujets traités, les exposés ont la clarté nécessaire à une première approche ; pour qui connaît quelques portées de la musique, l'éclairage de l'auteur guide des démarches parallèles, voire des prolongements. C. Allègre incite à penser, et à repenser la genèse des découvertes. Les livres d'histoire des sciences sont asphyxiants d'académisme lorsqu'ils ne montrent pas, avec simplicité, la dynamique de la pensée. La thèse de C. Allègre est d'un énoncé bref : combinatoire et non-linéarité sont, actuellement, les deux moteurs du progrès scientifique.

La transition vers un examen de l'enseignement est naturelle : la gymnastique actuelle imposée aux lycéens et aux étudiants, affirme C. Allègre, ne nous prépare pas à une bonne assimilation des connaissances. La diatribe de l'auteur est vigoureuse : notre enseignement est figé dans une uniformité inadaptée. Prémisses : la sélection doit être juste. Corollaire : l'élite : tous les candidats à un examen doivent être jugés sur des connaissances acquises dans des domaines clairement délimités, et sur leurs aptitudes au raisonnement logique. Conclusion : il n'existe pas de meilleur critère que les mathématiques. Ce raisonnement impeccable a, selon C. Allègre, des conséquences sociales et culturelles sclérosantes. Même quand l'auteur grossit le trait – si les mathématiques ne

sont pas bonnes pour tous les esprits, elles ne sont pas, non plus, universellement mauvaises – il reste convaincant. Ni la science, ni la technique, ni même les mathématiques, ne sont élaborées selon une logique linéaire. Les intuitions novatrices sont fondées sur des observations de détail, certainement pas sur la rigueur *ab initio*. Le livre illustre, par de multiples exemples, comment le hasard sourit aux esprits ouverts à l'imprévu. La spécialisation mathématique de l'enseignement, argumente C. Allègre, entraîne une monodimensionalité culturelle et une méconnaissance dramatique des grands thèmes de la science moderne. Si le complexe est la règle dans la nature, pourquoi ne pas en exposer les multiples facettes très tôt dans l'enseignement, avant de passer aux synthèses explicatives ? Pourquoi ne pas piquer la curiosité avant de la satisfaire ? Cette démarche favoriserait la souplesse d'esprit, la faculté inventive, le pragmatisme et la volonté d'explorer les problèmes tels qu'ils sont, au lieu d'en extraire une réduction, immédiatement mathématisable, mais déformée du réel.

Un diagnostic aussi clair n'impose-t-il pas une solution ? Hélas, les bouleversements qui sont la règle en science ne sont guère de mise dans notre enseignement : « Ce n'est pas parce que c'est difficile que nous n'osons pas, c'est difficile parce que nous n'osons pas », disait Sénèque repris depuis. C. Allègre confirme la nécessité d'adapter nos méthodes éducatives, et témoigne de la difficulté de le faire.

Philippe BOULANGER

Jeunesse

Méga expériences

Editions Nathan, 1995.

Quel beau livre ! Pas prétentieux, entraînant, suffisamment simple, moderne, illustré en couleur, consacré à des phénomènes essentiels, pratique, varié.

Je classe les livres qui proposent des expériences en deux groupes : ceux qui imposent l'emploi de matériel spécialisé – et je considère que ce sont plus des frustrations que des invitations à la science – et ceux qui, sans tambour ni trompettes, font découvrir les bases de la physique, de la chimie, de la botanique... Ces derniers, dans l'esprit de l'Association des Petits Débrouillards,

sont d'utilité publique. *Méga expériences* n'a pas de lien explicite avec de telles associations de « science en herbe », mais le document est si bon qu'on ne peut s'empêcher de faire le rapprochement entre les deux entreprises.

Un exemple ? Au hasard, les messages secrets : le livre propose d'écrire un message secret en humectant une feuille de papier, puis en couvrant du stylo, sur une seconde feuille qu'on interpose au-dessus de la première. Au séchage, le message disparaît, mais les fibres retiennent la mémoire des inscriptions, qui réapparaissent lorsqu'on mouille à nouveau le papier. La double page (c'est le concept éditorial retenu) n'omet pas de mentionner d'autres écri-

La Lumière solaire décomposée



Il te faut :

- un petit miroir,
- une assiette creuse,
- une feuille blanche.



1 Pose la feuille blanche sur le mur, à côté d'une fenêtre ensoleillée. Place l'assiette remplie d'eau au soleil, le miroir incliné à moitié dans l'eau.



2 Oriente le miroir pour que les couleurs de l'arc-en-ciel apparaissent sur la feuille de papier. C'est le spectre de la lumière blanche.

Comment faire un prisme sans prisme.

tures invisibles : le jus de citron, révélé par la chaleur de la bougie, la miniaturisation des textes, avec lesquels on remplit le point de lettres «i» d'un texte anodin, les encreurs invisibles au nitrate d'argent, révélées par la lumière vive. Enfin le texte évoque *Enigma*, la machine à coder utilisée pendant la Seconde Guerre mondiale. Chaque paragraphe est court (dix lignes au maximum), mais suffisant, simple, clair et accompagné d'une petite illustration en couleur. Au centre de la double page, une image plus grosse représente Sherlock Holmes décodant un texte.

Tom Tits, célèbre auteur de livres du même tabac, dirait qu'il y a peu d'originalité dans les expériences proposées, mais séparons les problèmes : c'est une chose que d'inviter les enfants à faire quelques expériences démonstratives, et c'est une autre chose que de mettre au point des expériences modernes, réalisables à l'aide d'un matériel sommaire, et par des enfants de surcroît. Ce serait d'ailleurs injuste d'écrire que le livre n'apporte pas son lot de nouveautés : on réalisera notamment avec un immense plaisir le moteur électrique proposé en pages 164-165 : un bouchon, six épingles, du fil électrique, une pile, un couteau et quelques aimants suffisent pour assurer le succès. Ou bien encore, à l'aide de lait, de vinaigre, d'un mouchoir et d'un verre on fera du «plastique sans pétrole».

On l'a compris : je suis un chaud partisan de ce type d'ouvrages, et j'engage les parents à profiter des fêtes de Noël pour offrir aux enfants de tels documents, qui contribueront à faire intelligemment découvrir les sciences.

Pascal TERBOIS

Paléontologie

La vie en catastrophes.

Vincent Courtillot. Éditions Fayard, 1995.

Depuis l'article fondateur de Luis Alvarez et de ses collaborateurs en 1980, une pléthore d'articles est venue appuyer ou rejeter leur hypothèse de la météorite tueuse des dinosaures. Le catastrophisme que l'on croyait passé aux oubliettes, dévoré au quotidien par l'uniformitarisme, s'en trouva certes revigoré, mais il devint bien difficile, dans ce tohu-bohu, de distinguer le bon grain de l'ivraie, les bons et moins bons arguments qui

servaient ou contredisaient l'hypothèse ravageuse. D'autant que le débat ne s'arrêtait pas au problème de la mort des dinosaures : dans la foulée, c'est toute l'histoire de la vie que l'on revisita, afin d'y reconnaître et d'y mesurer les catastrophes qui l'avaient émaillée.

L'entreprise reçut un écho médiatique tel que la controverse scientifique frisa plus d'une fois la polémique. Aussi faut-il souhaiter la bienvenue à la mise au point de Vincent Courtillot qui, avec ses analyses, ses doutes, sa culture, va en éclairer plus d'un sur cette question des extinctions en masse, faisant le tri dans ce maquis de résultats, venus de disciplines variées. Ce n'est pas le point de vue d'un géophysicien ordinaire qu'il donne, mais celui d'un scientifique curieux des autres sciences, géologiques ou biologiques. Il le faut pour aborder un tel sujet : le succès qu'il a obtenu dans la communauté scientifique n'est-il pas lié aux différentes approches qu'il requiert, qu'elles soient paléontologiques, géochimiques, sédimentologiques ou... géophysiques ? Au demeurant, la quête est loin d'être à son terme, et il est heureux qu'un ouvrage fasse un état de la question : du fait de cette multidisciplinarité, les résultats de l'un et des autres sont éparpillés dans diverses revues, des congrès, des séminaires, et il y a un trop-plein de livres sur le sujet, d'ailleurs d'inégale qualité.

La vie n'est pas un long fleuve tranquille, nous dit en substance l'auteur, mais elle est périodiquement bousculée par des sauts physiques, et l'essence des êtres s'en trouve modifiée : ces hasards de l'histoire de la planète Terre agissent comme des coupe-rets. Je ne suis pas de son avis (pour le moment !) et crois plutôt qu'il émane du caractère sélectif de la plupart des extinctions en masse leur ressource est à chercher dans la dynamique évolutive des espèces. Toutefois, il faut bien reconnaître que faire la part des choses est, à cette échelle géologique des temps, bien difficile, et je ne vais pas plus longtemps boudier mon plaisir face à un ouvrage à la vive écriture, qui aborde cette vaste question et élucide bien des aspects jusqu'ici laissés dans l'ombre.

L'argumentation développée est articulée, documentée et rendue tout à fait accessible, sans pour autant tomber dans la facilité. C'est un livre plein de rigueur, et donc de doute. En choisissant de raconter comment lui-même en est venu à s'intéresser à ce vaste problème, il est certain qu'il risque de susciter plus d'une vocation : il y aura même parmi eux des paléontologues ! Prenant ce fil chronologique de ses

propres recherches qui, de congrès en séminaires, d'articles en discussions avec des collègues l'a amené des traps du Delfin, aux Indes, aux laboratoires californiens. V. Courtillot découvre avec son lecteur la complexité du problème. Impacts de météorites, épanchements volcaniques, leur éventuelle périodicité à l'échelle géologique sont passés en revue, l'auteur s'attardant chaque fois sur les points forts et faibles des arguments avancés.

J'ai néanmoins trouvé que le spécialiste du paléomagnétisme, bon connaisseur de toutes méthodes physiques ou chimiques pour se repérer dans le temps, aurait pu s'exprimer plus longuement sur le sujet car les données dans ce domaine restent trop souvent variables selon les publications, et il serait judicieux que les spécialistes nous renseignent sur les pourquoi de ces errements. Sachant qu'en d'autres occasions l'auteur peut être disert sur le sujet et faire des exposés d'une grande clarté, qu'il considère cette critique comme une invitation à écrire un ouvrage sur la mesure du temps.

La bile de fond de cet essai réussi est une peinture des mœurs des scientifiques. Leurs (nos) vices et vertus y sont mis en scène, et l'on s'aperçoit que nous sommes des bipèdes fort ordinaires, tour à tour preux et couards, généreux et jaloux, «pointus» dans nos domaines respectifs et ignorant des autres jusqu'au mépris, préoccupés de nos carrières conduites sous la chape «sorbinotante», comme disait Alcofribas Nasier. D'une certaine façon, ce portrait de la gent scientifique éclaire la sociologie du groupe et ses préoccupations cachées. Je disais précédemment que le succès du thème de la mort des dinosaures était lié à la nécessité d'une approche pluridisciplinaire qu'il requerrait : en partie seulement. Pour l'autre, il me semble que les deux termes de «mort» et de «dinosaures» ont agi comme aimant pour les esprits. L'historien Philippe Ariès a noté les changements de mentalité dans l'attitude des sociétés modernes vis-à-vis de la mort : on n'y apprivoise plus Thanatos, on le rejette.

Et si, en se penchant sur celle des dinosaures, notre communauté rationnelle essaie de repenser avec lui ? Qui plus est, il s'agit de la mort d'animaux quasi mythiques, et ce sont peut-être des peurs d'enfant que l'on essaie de surmonter. N'oublions pas non plus que ce thème de la mort des espèces et du fonctionnement de la Planète bleue sont un quotidien dont il ne faut pas négliger la dimension historique. En cela, c'est un livre d'actualité qui nous est proposé.

Jean-Louis HARTENBERGER



FRANCE

culture

POUR LA

SCIENCE

VOUS INVITENT A
L'ENREGISTREMENT

PUBLIC

DE L'ÉMISSION
DE LA SÉRIE
L'IMPOSSIBLE :LES IMPOSSIBLES
DE LA LUTTE
ANTIVIRALEPOURQUOI DE
NOUVEAUX VIRUS
APPARAÎSSENT-ILS,
ET QUELLES SONT
NOS POSSIBILITÉS
D'ACTION?AVEC
B. LE GUENNO,
DE L'INSTITUT
PASTEURL'ENREGISTREMENT PUBLIC
AURA LIEU
LE SAMEDI 13 JANVIER 1996
À 15 HEURES
AU PALAIS DE LA DÉVOUVERTE,
AVENUE FRANKLIN ROOSEVELT

Entomologie

Guide des sauterelles,
grillons et criquets
d'Europe occidentaleH. Bellmann, G. Luquet. Éditions
Delachaux et Niestlé, 1995.

es noms de grillons, sauterelles ou
criquets éveillent dans notre
mémoire des impressions multiples.

Ce sont les émissions sonores, les
chants, les messages sexuels, le cri-cri
monotone ou le crissement répété que
H. Valéry note poétiquement : «l'insecte
net gratte les sèches herbes».

Ce sont les grandes invasions afri-
caines dévissant tout sur leur passage,
les grandes plaies, «le nuage qui obs-
curcit la clarté du soleil et transforme les
champs en désert» (Le Clézio).

Ce sont ces insectes familiers qui sau-
tent dans nos jambes au cours de nos
promenades champêtres, déployant par-
fois leurs ailes d'un bleu ou d'un rouge
intenses.

C'est la grande sauterelle verte, aux
longues antennes effilées, à la face hip-
pique, que Colette compare «au chan-
frein busqué de cheval meklembourgeois».

Ce sont les criquets qui, bouillis, frits
ou à la crème au sel, sont largement
consommés dans les régions où ils
abondent.

Pour l'entomologiste, ce sont des
insectes de l'ordre des Orthoptères, assez
grands (la plupart des espèces mesurent
entre deux et quatre centimètres de
long ; la plus petite fait moins de quatre
millimètres, tandis que la plus grande
atteint plus de six centimètres, sans com-
pter l'aviscaute), dont on a décrit plus de
20 000 espèces dans le monde, et plus
de 800 en Europe occidentale. La ma-
jorité se nourrit de végétaux, et certains,
surtout parmi les acridiens, occasionnent
des dégâts importants.

Ils ont été curieusement délaissés par
les naturalistes avertis, qui leur ont pré-
féré les papillons ou coléoptères. Souvent
abondants, ils fréquentent des milieux
variés : les plaines ou les montagnes éle-
vées, les prairies ou les forêts, la couche
superficielle du sol ou les fourmilières,
nos maisons ou le métro parisien, les
serres ou les grottes...

Aujourd'hui ce n'est pas l'absence de
documentation qui justifiera ce manque
d'intérêt. Nous disposons, avec le *Guide
des Sauterelles, Grillons et Criquets d'Eu-
rope occidentale* d'un ouvrage pratique,



La femelle de cette sauterelle *Ephippiger*, que
l'on voit ici en train de pondre dans un sol
meuble, peut atteindre parfois trois centimètres
de long. Son chant est une succession d'ac-
cents doubles (le premier strident et bref, le
second plus traînant), séparés par de longs
intervalles.

bien illustré, permettant de reconnaître
les 225 espèces de nos régions.

Une clef d'identification, d'après les
caractères morphologiques, aide à déter-
miner les échantillons vivants d'un bon
nombre d'espèces rencontrées sur le ter-
rain et l'on dépasse alors l'élémentaire dis-
tinction sauterelles et grillons à antennes
longues et filiformes, et criquets, à
antennes courtes ne dépassant pas la lon-
gueur du corps. La partie monographique,
de 287 pages, détaille l'aspect, la réparti-
tion, l'habitat, les mœurs de chaque espèce
figurée par des photographies en couleur
souvent pour les deux sexes.

Une partie originale de cet ouvrage
consiste dans la notation, pour une soixan-
taine d'espèces, de leur chant, ou stridu-
lation, avec une clef de détermination
permettant de reconnaître les types de
phrases, de successions, de séquences
ou de répétitions. Pour compléter ce
chapitre, un Guide sonore de François-
Régis Bonnet, reproduit sur un disque laser,
d'une durée de une heure et quart, les
émissions sonores de 75 espèces repré-
sentrant ainsi une annexe indispensable.

La parution de cette édition, qui comble
un vide, doit attirer l'attention de tous les
naturalistes sur un groupe d'insectes que
la taille et les mœurs rendent faciles et
passionnantes à observer.

Sur le plan écologique, leur adapta-
tion à des biotopes particuliers en font
souvent des indicateurs précis. Dans
quelques régions, leur nombre décroît

dangereusement, conséquence d'une
agriculture intensive ou d'une urbanisa-
tion galopante. Il paraît utile de prendre
des mesures de conservation pour
quelques espèces, en protégeant cer-
tains milieux caractéristiques.

Découvrir ces insectes, les mieux
connaître, les mieux suivre, n'est-ce
pas une façon de défendre notre envi-
ronnement et de perpétuer «les prairies

d'autrefois rennarde de sauterelles et de crickets «bruyants et bondissants», que nous risquons de perdre ?

Jacques d'AGUILAR

Biologie

La propriété intellectuelle dans le domaine du vivant : Actes de colloques

Éditions Lavoisier, collection Tec&Doc, octobre 1995.

On peut observer l'évolution des sociétés depuis plusieurs types d'observatoires : les lettres, l'art, les coutumes... et les règles de la propriété intellectuelle. En effet, l'évolution de celles-ci reflète tout à la fois les modifications dans la qualification des objets et des biens, et les transformations des circuits économiques.

La base de la règle des brevets, édictée à partir de la fin du XVIII^e siècle en Angleterre et en France, est une forme de contrat entre un inventeur et la société. Celle-ci propose à l'inventeur de lui permettre de jouir pleinement et exclusivement des fruits de son invention durant une période donnée à condition de la diffuser, pour le plus grand bien des citoyens et de la prospérité des États. Cette formalisation des droits et devoirs de l'inventeur a sans nul doute été un outil essentiel du progrès industriel et économique des pays d'Occident.

Très tôt, la question a néanmoins été de définir ce qu'était une invention par opposition aux choses naturelles ou aux découvertes qui accroissent les connaissances sans créer d'objet directement utilisable dans le circuit économique. C'est l'application de ces distinctions au monde vivant qui a subi les transformations les plus spectaculaires sous l'effet du développement des biotechnologies, puis du génie génétique. En effet, les êtres vivants faisaient initialement parti de ces «choses naturelles» non brevetables. Mais, dès la fin du XIX^e siècle, cette règle commença de comporter de nombreuses exceptions avec les procédés biotechnologiques, puis, avant la guerre, avec les variétés végétales aux États-Unis. En 1985 était brevetée, en Amérique, une souche de bactéries génétiquement modifiée : une huître polyploïde en 1987, une lignée de souris transgéniques en 1988. En 1992, enfin, les instituts américains de la santé cherchaient à protéger des séquences

partielles de gènes, d'identité et de fonction inconnues.

C'est ainsi d'abord ces questions dans le souci du respect des personnes, des intérêts des différents partenaires des biotechnologies et du progrès économique que s'est tenu, les 26 et 27 janvier 1995, un colloque international sous l'égide de l'Académie des sciences et de la Fondation Singer-Polignac. Les actes de ce colloque sont maintenant publiés dans la collection Tec&Doc des Éditions Lavoisier.

Dans cet ouvrage, la philosophe Anne Fagot-Breault s'interroge sur le statut des arts technologiques résultant de la libre créativité des chercheurs, sur la notion de propriété du patrimoine biologique et, enfin, sur la finalité des entreprises biotechnologiques. Elle rappelle qu'une entreprise qui a pour finalité le «progrès» n'est pas, de ce fait, exonérée de toute possibilité de nuire.

Jean Poyer, président de l'Académie des sciences morales et politiques, met en perspective l'évolution des droits des brevets et son adaptation aux révolutions techniques, notamment biotechnologiques. Afin de bien cadrer les éléments de la discussion, les règles de la propriété intellectuelle appliquées en Europe, au Japon et aux États-Unis sont comparées, avec une analyse de la signification et des conséquences des différences entre ces règles. Sont également évoqués les problèmes de pays en développement qui ne reconnaissent pas les règles internationales des brevets.

Puis sont successivement traitées les questions des brevets sur les gènes, de la protection des banques de données et des questions éthiques soulevées par l'application au monde vivant des règles de la propriété intellectuelle. Est ainsi rappelé le statut composite des gènes, molécules chimiques comme d'autres, mais dépositaires de la singularité génétique des individus.

La nécessité de concilier des mesures incitatives pour les entreprises biotechnologiques, la libre circulation de la connaissance et le respect des personnes apparaissent à chacun, même si les solutions proposées restent éloignées. C'est ainsi que presque tous les participants s'accordent pour reconnaître que le gène, en tant que tel, ne peut être breveté,

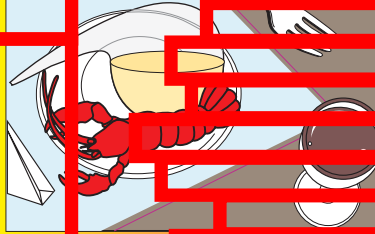
mais que les brevets nécessitant dans leur description l'utilisation d'un gène cloné sont habituels et indispensables. Or, la notion de gène «en tant que tel» est parfaitement théorique, puisqu'il faut le cloner pour le connaître. Dans la réalité, par conséquent, les gènes clonés sont protégés par les règles de la propriété intellectuelle, et le débat porte plus sur l'étendue de cette protection que sur sa

FRANCE INFO
et
POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monemcoud.

Info Sciences

Tous les jours
sur France Info
à 11 heures 44,
16 heures 21,
18 heures 14,
20 heures 12,
22 heures 21
et 0 heure 51



Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 22 janvier 1996.

FRANCE
info

POUR LA 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 Gauthier, Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot. Secrétariat : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Monique Pouzol. Direction financière : Pierre Lecomte. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Fabienne Louis. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet. Ont également collaboré à ce numéro : Stéphane Ami, Bettina Debû, Paul Decaix, Marie-Thérèse Larrous, Isabelle Ledoux, Michel Mallat, Anne Masé, Anne Maumont, Carmen Müller, Claude Olivier, Jacqueline Stern.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Kenrick. Board of editors : Michelle Press (Managing Editor), 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. Co-Chairman : John Moeling, Vincent Barger, Robert Biewen.

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 : LIBEIN 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 adressés 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 18A, 18B, 98A et 98B des bulletins d'abonnement.

légitimité : s'étend-elle à la connaissance de la séquence du gène et à tout ce à quoi elle peut servir, ou simplement à l'usage que s'en a imaginé le premier déposant, la connaissance du gène restant d'utilisation libre pour tout autre usage?

La libre circulation des informations scientifiques, particulièrement des séquences génétiques telles qu'elles sont stockées dans les banques de données, est une nécessité et une exigence de l'éthique de la recherche. Mais rien ne peut oblier, si ce n'est leur intérêt, des sociétés privées ayant réalisé de telles banques de données dans le cadre de leur activité industrielle ou commerciale, d'en laisser un libre accès à quiconque, notamment à leur concurrent, et il revient à la recherche académique d'accumuler les masses d'informations librement accessibles à toute la communauté scientifique qui sont la condition d'une non-confiscation de certains domaines de recherche par les intérêts privés.

Les problèmes éthiques posés par les brevets sur les gènes et sur les êtres vivants sont de plusieurs ordres : (1) Toute appropriation, même temporaire, d'un élément du programme génétique d'un individu du nuirait évidemment à sa liberté et à sa dignité et ne peut donc être justifiée.

(2) La prise de contrôle, par les pouvoirs industrialisés, de la diversité génétique des pays du Sud pourrait être un facteur d'aggravation de la dépendance des seconds vis-à-vis des premiers. (3) Certaines inventions biotechnologiques pourraient par elles-mêmes porter atteinte à la sécurité, à la liberté ou à la dignité de la personne.

Pour autant, faut-il que les offices de brevets s'érigent en instance éthique, ou bien ne doivent-ils fonder leurs décisions que sur les critères habituels de brevetabilité que sont la description suffisante permettant la reproductibilité, la nouveauté, l'inventivité et l'utilité? Ou bien faut-il laisser le soin de cette analyse éthique aux instances qui auront à décider de l'exploitation d'un brevet? Telles sont certaines questions autour desquelles se sont accumulés les débats du colloque de l'Académie des sciences.

D'autres aspects plus techniques ont également été abordés, tels que l'étendue légitime des revendications d'un brevet, le moment optimal pour breveter, dans ce continuum qui va de la découverte à l'invention, etc. Si les juristes, éthiciens, industriels et scientifiques présents n'ont pu parvenir à un consensus sur toutes ces questions, du moins le dialogue a-t-il été possible, et même riche, chacun avançant ses solutions pour que l'application des lois sur la propriété intellectuelle aux nouvelles entités engendrées par les biotechnologies et la génétique moderne contribuent réellement au progrès et au bien-être du plus grand nombre et ne constituent jamais les outils d'une réification inexorable du vivant et de l'humain. Cependant, l'importance des intérêts économiques en jeu et la prédominance de la philosophie «utilitariste» dans les sociétés économiquement développées ne permettent pas d'être vraiment rassuré sur ce dernier point.

Axel KAHN

RÉFÉRENCES DES ILLUSTRATIONS

Couverture : Slim Films. P. 9 : Éditions Casterman. P. 12 : Éditions Belin. P. 13 : Jean-Loup Charvet. P. 14 : doc. PLS. P. 16 : RÉA (Charvet). P. 17 : C. Barroso Ruiz et P. Medina Lara. Pp. 20 et 21 : doc. PLS. P. 22 : Claudio Vita, CEA/DIEP. P. 23 : Kamon Sciences Corporation. P. 24 : C. Menoz-Yañue/Eurelios. P. 25 : Belin-Sidney Harris. P. 26 : P. Cardon. Pp. 28 et 29 : Roberto Osti. Pp. 30 et 31 (en haut) : Laurie Grace. P. 31 (en bas) : Nigel Brothers, Parks and Wildlife Service, Asmara. P. 32 (poissons) : R. Osti. P. 32 (graphiques) : L. Grace. P. 34 (en haut) : David W. Harp. P. 34 (en bas) : Kaku Kurita, Gamma Liaison. P. 35 (en haut) : D.W. Harp. P. 35 (en bas) : L. Grace. Pp. 38 et 39 : Dana Burns-Pizer. Pp. 40 et 41 (microphotographies) : Wolfgang Streit. Pp. 40 et 41 (dessins) : D. Burns-Pizer. P. 42 : Avec l'autorisation de William Friedland, *The Penfield Archive*. P. 43 (à gauche) : Haruhiko Akiyama, Tokyo Institute of Psychiatry.

Wildland Collection. P. 63 (en bas à gauche) : Fridmar Darn, *Leo de Wys*. P. 63 (en bas à droite) : Boris Dmitriev. Pp. 64 et 65 : Charles O'Rear. Pp. 66 et 67 : Jared Schneidman, JSD. Pp. 68 et 69 (à gauche) : Eric Sander. P. 69 (à droite) : California Institute of Technology. P. 70 : E. Sander. Pp. 72 et 73 : Tom Draper, Hans Reinhard, Bruce Coleman, Inc., Video Surgery, Photo Researchers, Inc. et Ken Eward, BioGrafx, Science Source, Photo Researchers, Inc. P. 74 (en haut) : Gregory G. Dimijian, Photo Researchers, Inc. P. 74 (en bas à gauche) : Pat Greany, USDA. P. 74 (en bas à droite) : Scott Nielsen, Bruce Coleman, Inc. P. 75 (à gauche) : Norbert Wu. P. 75 (à droite) : David Madison, Bruce Coleman, Inc. P. 76 (en haut) : Bettmann Archive. P. 76 (en bas) : E.R. Degginger, Animals, Animals. P. 80 : 81 : 82 : 83 : 84 : 85 : 86 : 87 : 88 : 89 : 90 : 91 : 92 : 93 : 94 : 95 : 96 : 97 : 98 : 99 : 100 : 101 : 102 : 103 : 104 : 105 : 106 : 107 : 108 : 109 : 110 : 111 : 112 : 113 : 114 : 115 : 116 : 117 : 118 : 119 : 120 : 121 : 122 : 123 : 124 : 125 : 126 : 127 : 128 : 129 : 130 : 131 : 132 : 133 : 134 : 135 : 136 : 137 : 138 : 139 : 140 : 141 : 142 : 143 : 144 : 145 : 146 : 147 : 148 : 149 : 150 : 151 : 152 : 153 : 154 : 155 : 156 : 157 : 158 : 159 : 160 : 161 : 162 : 163 : 164 : 165 : 166 : 167 : 168 : 169 : 170 : 171 : 172 : 173 : 174 : 175 : 176 : 177 : 178 : 179 : 180 : 181 : 182 : 183 : 184 : 185 : 186 : 187 : 188 : 189 : 190 : 191 : 192 : 193 : 194 : 195 : 196 : 197 : 198 : 199 : 200 : 201 : 202 : 203 : 204 : 205 : 206 : 207 : 208 : 209 : 210 : 211 : 212 : 213 : 214 : 215 : 216 : 217 : 218 : 219 : 220 : 221 : 222 : 223 : 224 : 225 : 226 : 227 : 228 : 229 : 230 : 231 : 232 : 233 : 234 : 235 : 236 : 237 : 238 : 239 : 240 : 241 : 242 : 243 : 244 : 245 : 246 : 247 : 248 : 249 : 250 : 251 : 252 : 253 : 254 : 255 : 256 : 257 : 258 : 259 : 260 : 261 : 262 : 263 : 264 : 265 : 266 : 267 : 268 : 269 : 270 : 271 : 272 : 273 : 274 : 275 : 276 : 277 : 278 : 279 : 280 : 281 : 282 : 283 : 284 : 285 : 286 : 287 : 288 : 289 : 290 : 291 : 292 : 293 : 294 : 295 : 296 : 297 : 298 : 299 : 300 : 301 : 302 : 303 : 304 : 305 : 306 : 307 : 308 : 309 : 310 : 311 : 312 : 313 : 314 : 315 : 316 : 317 : 318 : 319 : 320 : 321 : 322 : 323 : 324 : 325 : 326 : 327 : 328 : 329 : 330 : 331 : 332 : 333 : 334 : 335 : 336 : 337 : 338 : 339 : 340 : 341 : 342 : 343 : 344 : 345 : 346 : 347 : 348 : 349 : 350 : 351 : 352 : 353 : 354 : 355 : 356 : 357 : 358 : 359 : 360 : 361 : 362 : 363 : 364 : 365 : 366 : 367 : 368 : 369 : 370 : 371 : 372 : 373 : 374 : 375 : 376 : 377 : 378 : 379 : 380 : 381 : 382 : 383 : 384 : 385 : 386 : 387 : 388 : 389 : 390 : 391 : 392 : 393 : 394 : 395 : 396 : 397 : 398 : 399 : 400 : 401 : 402 : 403 : 404 : 405 : 406 : 407 : 408 : 409 : 410 : 411 : 412 : 413 : 414 : 415 : 416 : 417 : 418 : 419 : 420 : 421 : 422 : 423 : 424 : 425 : 426 : 427 : 428 : 429 : 430 : 431 : 432 : 433 : 434 : 435 : 436 : 437 : 438 : 439 : 440 : 441 : 442 : 443 : 444 : 445 : 446 : 447 : 448 : 449 : 450 : 451 : 452 : 453 : 454 : 455 : 456 : 457 : 458 : 459 : 460 : 461 : 462 : 463 : 464 : 465 : 466 : 467 : 468 : 469 : 470 : 471 : 472 : 473 : 474 : 475 : 476 : 477 : 478 : 479 : 480 : 481 : 482 : 483 : 484 : 485 : 486 : 487 : 488 : 489 : 490 : 491 : 492 : 493 : 494 : 495 : 496 : 497 : 498 : 499 : 500 : 501 : 502 : 503 : 504 : 505 : 506 : 507 : 508 : 509 : 510 : 511 : 512 : 513 : 514 : 515 : 516 : 517 : 518 : 519 : 520 : 521 : 522 : 523 : 524 : 525 : 526 : 527 : 528 : 529 : 530 : 531 : 532 : 533 : 534 : 535 : 536 : 537 : 538 : 539 : 540 : 541 : 542 : 543 : 544 : 545 : 546 : 547 : 548 : 549 : 550 : 551 : 552 : 553 : 554 : 555 : 556 : 557 : 558 : 559 : 560 : 561 : 562 : 563 : 564 : 565 : 566 : 567 : 568 : 569 : 570 : 571 : 572 : 573 : 574 : 575 : 576 : 577 : 578 : 579 : 580 : 581 : 582 : 583 : 584 : 585 : 586 : 587 : 588 : 589 : 590 : 591 : 592 : 593 : 594 : 595 : 596 : 597 : 598 : 599 : 600 : 601 : 602 : 603 : 604 : 605 : 606 : 607 : 608 : 609 : 610 : 611 : 612 : 613 : 614 : 615 : 616 : 617 : 618 : 619 : 620 : 621 : 622 : 623 : 624 : 625 : 626 : 627 : 628 : 629 : 630 : 631 : 632 : 633 : 634 : 635 : 636 : 637 : 638 : 639 : 640 : 641 : 642 : 643 : 644 : 645 : 646 : 647 : 648 : 649 : 650 : 651 : 652 : 653 : 654 : 655 : 656 : 657 : 658 : 659 : 660 : 661 : 662 : 663 : 664 : 665 : 666 : 667 : 668 : 669 : 670 : 671 : 672 : 673 : 674 : 675 : 676 : 677 : 678 : 679 : 680 : 681 : 682 : 683 : 684 : 685 : 686 : 687 : 688 : 689 : 690 : 691 : 692 : 693 : 694 : 695 : 696 : 697 : 698 : 699 : 700 : 701 : 702 : 703 : 704 : 705 : 706 : 707 : 708 : 709 : 710 : 711 : 712 : 713 : 714 : 715 : 716 : 717 : 718 : 719 : 720 : 721 : 722 : 723 : 724 : 725 : 726 : 727 : 728 : 729 : 730 : 731 : 732 : 733 : 734 : 735 : 736 : 737 : 738 : 739 : 740 : 741 : 742 : 743 : 744 : 745 : 746 : 747 : 748 : 749 : 750 : 751 : 752 : 753 : 754 : 755 : 756 : 757 : 758 : 759 : 760 : 761 : 762 : 763 : 764 : 765 : 766 : 767 : 768 : 769 : 770 : 771 : 772 : 773 : 774 : 775 : 776 : 777 : 778 : 779 : 780 : 781 : 782 : 783 : 784 : 785 : 786 : 787 : 788 : 789 : 790 : 791 : 792 : 793 : 794 : 795 : 796 : 797 : 798 : 799 : 800 : 801 : 802 : 803 : 804 : 805 : 806 : 807 : 808 : 809 : 810 : 811 : 812 : 813 : 814 : 815 : 816 : 817 : 818 : 819 : 820 : 821 : 822 : 823 : 824 : 825 : 826 : 827 : 828 : 829 : 830 : 831 : 832 : 833 : 834 : 835 : 836 : 837 : 838 : 839 : 840 : 841 : 842 : 843 : 844 : 845 : 846 : 847 : 848 : 849 : 850 : 851 : 852 : 853 : 854 : 855 : 856 : 857 : 858 : 859 : 860 : 861 : 862 : 863 : 864 : 865 : 866 : 867 : 868 : 869 : 870 : 871 : 872 : 873 : 874 : 875 : 876 : 877 : 878 : 879 : 880 : 881 : 882 : 883 : 884 : 885 : 886 : 887 : 888 : 889 : 890 : 891 : 892 : 893 : 894 : 895 : 896 : 897 : 898 : 899 : 900 : 901 : 902 : 903 : 904 : 905 : 906 : 907 : 908 : 909 : 910 : 911 : 912 : 913 : 914 : 915 : 916 : 917 : 918 : 919 : 920 : 921 : 922 : 923 : 924 : 925 : 926 : 927 : 928 : 929 : 930 : 931 : 932 : 933 : 934 : 935 : 936 : 937 : 938 : 939 : 940 : 941 : 942 : 943 : 944 : 945 : 946 : 947 : 948 : 949 : 950 : 951 : 952 : 953 : 954 : 955 : 956 : 957 : 958 : 959 : 960 : 961 : 962 : 963 : 964 : 965 : 966 : 967 : 968 : 969 : 970 : 971 : 972 : 973 : 974 : 975 : 976 : 977 : 978 : 979 : 980 : 981 : 982 : 983 : 984 : 985 : 986 : 987 : 988 : 989 : 990 : 991 : 992 : 993 : 994 : 995 : 996 : 997 : 998 : 999 : 1000

Camera 5, avec l'autorisation de Dubé Juggling Equipment. P. 82 : Wolfgang Decker, d'après Bill... P. 83 : 84 : 85 : 86 : 87 : 88 : 89 : 90 : 91 : 92 : 93 : 94 : 95 : 96 : 97 : 98 : 99 : 100 : 101 : 102 : 103 : 104 : 105 : 106 : 107 : 108 : 109 : 110 : 111 : 112 : 113 : 114 : 115 : 116 : 117 : 118 : 119 : 120 : 121 : 122 : 123 : 124 : 125 : 126 : 127 : 128 : 129 : 130 : 131 : 132 : 133 : 134 : 135 : 136 : 137 : 138 : 139 : 140 : 141 : 142 : 143 : 144 : 145 : 146 : 147 : 148 : 149 : 150 : 151 : 152 : 153 : 154 : 155 : 156 : 157 : 158 : 159 : 160 : 161 : 162 : 163 : 164 : 165 : 166 : 167 : 168 : 169 : 170 : 171 : 172 : 173 : 174 : 175 : 176 : 177 : 178 : 179 : 180 : 181 : 182 : 183 : 184 : 185 : 186 : 187 : 188 : 189 : 190 : 191 : 192 : 193 : 194 : 195 : 196 : 197 : 198 : 199 : 200 : 201 : 202 : 203 : 204 : 205 : 206 : 207 : 208 : 209 : 210 : 211 : 212 : 213 : 214 : 215 : 216 : 217 : 218 : 219 : 220 : 221 : 222 : 223 : 224 : 225 : 226 : 227 : 228 : 229 : 230 : 231 : 232 : 233 : 234 : 235 : 236 : 237 : 238 : 239 : 240 : 241 : 242 : 243 : 244 : 245 : 246 : 247 : 248 : 249 : 250 : 251 : 252 : 253 : 254 : 255 : 256 : 257 : 258 : 259 : 260 : 261 : 262 : 263 : 264 : 265 : 266 : 267 : 268 : 269 : 270 : 271 : 272 : 273 : 274 : 275 : 276 : 277 : 278 : 279 : 280 : 281 : 282 : 283 : 284 : 285 : 286 : 287 : 288 : 289 : 290 : 291 : 292 : 293 : 294 : 295 : 296 : 297 : 298 : 299 : 300 : 301 : 302 : 303 : 304 : 305 : 306 : 307 : 308 : 309 : 310 : 311 : 312 : 313 : 314 : 315 : 316 : 317 : 318 : 319 : 320 : 321 : 322 : 323 : 324 : 325 : 326 : 327 : 328 : 329 : 330 : 331 : 332 : 333 : 334 : 335 : 336 : 337 : 338 : 339 : 340 : 341 : 342 : 343 : 344 : 345 : 346 : 347 : 348 : 349 : 350 : 351 : 352 : 353 : 354 : 355 : 356 : 357 : 358 : 359 : 360 : 361 : 362 : 363 : 364 : 365 : 366 : 367 : 368 : 369 : 370 : 371 : 372 : 373 : 374 : 375 : 376 : 377 : 378 : 379 : 380 : 381 : 382 : 383 : 384 : 385 : 386 : 387 : 388 : 389 : 390 : 391 : 392 : 393 : 394 : 395 : 396 : 397 : 398 : 399 : 400 : 401 : 402 : 403 : 404 : 405 : 406 : 407 : 408 : 409 : 410 : 411 : 412 : 413 : 414 : 415 : 416 : 417 : 418 : 419 : 420 : 421 : 422 : 423 : 424 : 425 : 426 : 427 : 428 : 429 : 430 : 431 : 432 : 433 : 434 : 435 : 436 : 437 : 438 : 439 : 440 : 441 : 442 : 443 : 444 : 445 : 446 : 447 : 448 : 449 : 450 : 451 : 452 : 453 : 454 : 455 : 456 : 457 : 458 : 459 : 460 : 461 : 462 : 463 : 464 : 465 : 466 : 467 : 468 : 469 : 470 : 471 : 472 : 473 : 474 : 475 : 476 : 477 : 478 : 479 : 480 : 481 : 482 : 483 : 484 : 485 : 486 : 487 : 488 : 489 : 490 : 491 : 492 : 493 : 494 : 495 : 496 : 497 : 498 : 499 : 500 : 501 : 502 : 503 : 504 : 505 : 506 : 507 : 508 : 509 : 510 : 511 : 512 : 513 : 514 : 515 : 516 : 517 : 518 : 519 : 520 : 521 : 522 : 523 : 524 : 525 : 526 : 527 : 528 : 529 : 530 : 531 : 532 : 533 : 534 : 535 : 536 : 537 : 538 : 539 : 540 : 541 : 542 : 543 : 544 : 545 : 546 : 547 : 548 : 549 : 550 : 551 : 552 : 553 : 554 : 555 : 556 : 557 : 558 : 559 : 560 : 561 : 562 : 563 : 564 : 565 : 566 : 567 : 568 : 569 : 570 : 571 : 572 : 573 : 574 : 575 : 576 : 577 : 578 : 579 : 580 : 581 : 582 : 583 : 584 : 585 : 586 : 587 : 588 : 589 : 590 : 591 : 592 : 593 : 594 : 595 : 596 : 597 : 598 : 599 : 600 : 601 : 602 : 603 : 604 : 605 : 606 : 607 : 608 : 609 : 610 : 611 : 612 : 613 : 614 : 615 : 616 : 617 : 618 : 619 : 620 : 621 : 622 : 623 : 624 : 625 : 626 : 627 : 628 : 629 : 630 : 631 : 632 : 633 : 634 : 635 : 636 : 637 : 638 : 639 : 640 : 641 : 642 : 643 : 644 : 645 : 646 : 647 : 648 : 649 : 650 : 651 : 652 : 653 : 654 : 655 : 656 : 657 : 658 : 659 : 660 : 661 : 662 : 663 : 664 : 665 : 666 : 667 : 668 : 669 : 670 : 671 : 672 : 673 : 674 : 675 : 676 : 677 : 678 : 679 : 680 : 681 : 682 : 683 : 684 : 685 : 686 : 687 : 688 : 689 : 690 : 691 : 692 : 693 : 694 : 695 : 696 : 697 : 698 : 699 : 700 : 701 : 702 : 703 : 704 : 705 : 706 : 707 : 708 : 709 : 710 : 711 : 712 : 713 : 714 : 715 : 716 : 717 : 718 : 719 : 720 : 721 : 722 : 723 : 724 : 725 : 726 : 727 : 728 : 729 : 730 : 731 : 732 : 733 : 734 : 735 : 736 : 737 : 738 : 739 : 740 : 741 : 742 : 743 : 744 : 745 : 746 : 747 : 748 : 749 : 750 : 751 : 752 : 753 : 754 : 755 : 756 : 757 : 758 : 759 : 760 : 761 : 762 : 763 : 764 : 765 : 766 : 767 : 768 : 769 : 770 : 771 : 772 : 773 : 774 : 775 : 776 : 777 : 778 : 779 : 780 : 781 : 782 : 783 : 784 : 785 : 786 : 787 : 788 : 789 : 790 : 791 : 792 : 793 : 794 : 795 : 796 : 797 : 798 : 799 : 800 : 801 : 802 : 803 : 804 : 805 : 806 : 807 : 808 : 809 : 810 : 811 : 812 : 813 : 814 : 815 : 816 : 817 : 818 : 819 : 820 : 821 : 822 : 823 : 824 : 825 : 826 : 827 : 828 : 829 : 830 : 831 : 832 : 833 : 834 : 835 : 836 : 837 : 838 : 839 : 840 : 841 : 842 : 843 : 844 : 845 : 846 : 847 : 848 : 849 : 850 : 851 : 852 : 853 : 854 : 855 : 856 : 857 : 858 : 859 : 860 : 861 : 862 : 863 : 864 : 865 : 866 : 867 : 868 : 869 : 870 : 871 : 872 : 873 : 874 : 875 : 876 : 877 : 878 : 879 : 880 : 881 : 882 : 883 : 884 : 885 : 886 : 887 : 888 : 889 : 890 : 891 : 892 : 893 : 894 : 895 : 896 : 897 : 898 : 899 : 900 : 901 : 902 : 903 : 904 : 905 : 906 : 907 : 908 : 909 : 910 : 911 : 912 : 913 : 914 : 915 : 916 : 917 : 918 : 919 : 920 : 921 : 922 : 923 : 924 : 925 : 926 : 927 : 928 : 929 : 930 : 931 : 932 : 933 : 934 : 935 : 936 : 937 : 938 : 939 : 940 : 941 : 942 : 943 : 944 : 945 : 946 : 947 : 948 : 949 : 950 : 951 : 952 : 953 : 954 : 955 : 956 : 957 : 958 : 959 : 960 : 961 : 962 : 963 : 964 : 965 : 966 : 967 : 968 : 969 : 970 : 971 : 972 : 9