



POUR LA

SCIENCE

Mai 1997

édition française de

SCIENTIFIC
AMERICAN

Hipparcos,
chasseur d'étoiles

La thérapie génique

La supraconduction

Les taches du léopard

Les plantes à sang chaud

Les défis de la psychiatrie

La ressemblance mathématisée

Dossier Internet : ordonner le chaos

Canada : \$ 8,75

Bloc-notes de Didier Jordon

5



Jeu-concours

6

Le problème des échelles
par Pierre Tougne



Science et finance

7

Les deux marchés : Walras et Keynes
par Christian Walter



Point de vue

8

Le coût du patrimoine
par Jean-Paul Demoule



Les inattendus de la science 10

Les inattendus en neurophysiologie
par Henri Korn



Science et gastronomie

14

La cuisson

Perspectives scientifiques :

16

La banque d'Europe

Virus HTLV et migrations humaines

Pavillon de l'oreille et acoustique

Maternité et tolérance

Étranges collisions

Fluctuations géantes dans les silos à grains

Douteux témoignages

Photographie en trois dimensions

Ce qui est écrit

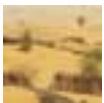
D'Afrique en Europe



Logique et calcul

100

La ressemblance mathématisée
par Jean-Paul Delahaye



L'image du mois

106

L'avancée des dunes
par Pierre Rognon



Analyses de livres

108

– Non, l'avenir n'est pas héréditaire, par Hervé Ponchelet

– Imago Mundi, par Francesco Bertola

– Les anatomies de la pensée, par Alain Prochiantz

– Chimie organique avancée, par F.A. Carey et R.J. Sundberg

Du gène au traitement

28

par William Haseltine

En identifiant les gènes humains responsables de maladies, les généticiens fabriquent des protéines qui ont des propriétés thérapeutiques potentielles.



La chimie des formes

34

par Patrick de Kennen

et Catherine de Dulos

Des réactions chimiques engendrent des figures évoquant les rayures du zèbre et les taches du léopard. Ces similarités sont-elles fortuites?



HIPPARCOS, satellite chasseur d'étoiles

70

par François Mignard
et Christian Martin

La position, le mouvement et l'éclat de 118 000 étoiles ont été mesurés avec une grande précision. Ces informations améliorent la mesure de l'Univers.



DOSSIER INTERNET

L'Internet : du chaos à l'ordre?

L'Internet est victime de son propre succès : les réseaux sont saturés et l'information qui y circule est fantasque, éphémère et elle n'est pas classée. Comment y remédier?

La recherche d'informations

44

par Clifford Lynch

Les bibliothèques numériques

49

par Michael Lesk

Le filtrage d'informations

52

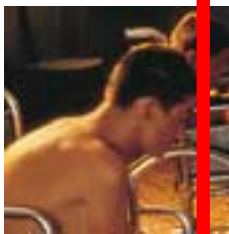
par Paul Resnick



Le fléau des maladies mentales 80

par Arthur Kleinman
et Alex Cohen

Les troubles psychiatriques abondent dans les pays en développement, mais les soins sont insuffisants.

**Kamerlingh Onnes découvre la supraconduction** 84

par Rudolf de Bruyn Ouboter

La course au zéro absolu a conduit, en 1911, à une découverte inattendue : la résistance des métaux s'annule à basse température.

**Des plantes à sang chaud** 90

par Roger Seymour

Certaines fleurs dégagent une grande quantité de chaleur lorsqu'elles fleurissent. Certaines d'entre elles règlent même leur température dans d'étroites limites, comme des animaux à sang chaud.

**DOSSIER INTERNET****Le multilinguisme** 55

par Bruno Oudet

Les interfaces de recherche 57

par Martin Hearst

Les systèmes sécurisés 62

par Mark Stefik

Transferts rapides 66

par Jacques Dupraz

Les archives d'un réseau actif 68

par Brewster Kahle

**ÉDITORIAL****La genèse des ressemblances**

Certains gènes sont spécialisés dans la construction des formes : ils orchestrent la différenciation des cellules, leur spécialisation et leur mort après qu'elles ont rempli leurs tâches.

L'extraordinaire est que nous partageons de nombreux gènes de morphogenèse avec les moules et les vers de terre, et que nos organes soient hérités d'un si lointain passé. Les naturalistes le savaient par les analogies de forme, les biologistes ont identifié les gènes responsables de similitudes même lointaines.

L'extraordinaire est aussi que nous ressemblions autant à nos ascendants les plus proches : notre nez sera bourbonien si nous appartenons à une famille royale. Ce qui pose la question annexe de la mesure de la ressemblance (*La ressemblance mathématisée*, par Jean-Paul Delahaye, page 100).

Dans quelle mesure les gènes sont-ils directement responsables des formes? Ceux qui président à la formation de la peau du léopard ne déterminent pas précisément la forme des taches qui apparaîtront sur le pelage, ils créent les conditions physico-chimiques qui feront que ces taches se forment. Les chimistes ont examiné, en laboratoire, comment des réactions chimiques reproduisent les raies, les taches et les zébrures animales (*La chimie des formes*, par Patrick de Kepper et Étiennette Dulos, page 34).

À mesure que les biologistes étudient le développement, ils éliminent le faux problème de l'inné et de l'acquis, périodiquement résurgent parce qu'utilisé par des politiques sans scrupules. L'évolution a augmenté la complexité des organismes et, dès lors, l'acquis génétique est plus une potentialité qu'une limitation ou qu'une qualité exprimée. Henri Korn (*Les inattendus de la neurophysiologie*, page 10) rappelle, entre autres, les expériences d'apprentissage chez les singes : lorsque certains organes sont actifs ou activés, la taille des zones du cerveau correspondantes augmentent. La biologie porte un éclairage humaniste sur la condition... animale.

Philippe BOULANGER

L'arme de Damoclès

Les gardes-chasse africains scient à la tronçonneuse les cornes des rhinocéros. Les pratiques témoignent-elles de la cruauté humaine? Non. En un sens, c'est pire. On prive le rhinocéros de ses cornes... pour son bien! Les cornes ont une réputation d'aphrodisiaque; les braconniers, afin de se les procurer, n'hésitent pas à tuer l'animal. Dans d'autres parcs africains, ce sont les éléphants qu'on estropie: on leur coupe les défenses pour leur éviter la convoitise des trafiquants d'ivoire.

Mutiler pour sauver... Amer bilan des comportements humains! N'est-il pas révélateur que ce qui fait courir un danger mortel aux éléphants et aux rhinocéros, ce sont précisément les armes redoutables dont la nature les a dotés?

Le gène logiquement gênant

L'avenir n'est pas héréditaire. Cette formule fait le titre d'un livre d'Hervé Ponchelet (Gallimard, 1997). Il se pourrait que l'avenir ne soit pas rose non plus. Nous allons tous finir par nous savoir porteurs de tel ou tel gène menant à telle ou telle maladie grave. La médecine prédictive «précipitera inéluctablement vers les hôpitaux psychiatriques une foule de bien-portants obsédés par le spectre de la maladie physique prédite. Une devise pour ce meilleur des mondes prédictifs: tous hypocondriaques».

«Lieux veut imiter le héros de Beaumarchais: «Je me presse de rire de tout, de peur d'être obligé d'en pleurer.» Il n'est pas de jour où l'on n'annonce la mise en évidence de gènes nouveaux. Gâteaux dorés que la découverte du gène de l'hypochondrie est pour bientôt. Voilà de quoi rire. Si un individu est hypocondriaque, en effet, c'est qu'il est porteur du gène de l'hypochondrie. Et s'il est porteur du gène de l'hypochondrie, c'est que sa maladie est réelle: il n'est donc pas hypocondriaque!

Ainsi, la génétique rajeunit une ancienne difficulté logique. Bonne nouvelle!

Indifférence publicitaire?

Quel est l'impact exact de la publicité sur les chiffres de vente? Question difficile souvent posée, jamais résolue tant sont nombreux et entremêlés les facteurs à analyser. Heureusement, une expérience en vraie grandeur vient d'être réalisée, qui permet d'obtenir une réponse indiscutable.

Dans *Le Monde* du 25 février 1997, un placard publicitaire vantant le dernier en date des livres de M. Alain Peyrefitte sur la Chine annonce qu'il 95 000 exemplaires ont déjà été vendus. Ce chiffre exact est-il censé posséder quelque vertu propre à déclencher l'achat? Toujours est-il que le même journal, relative le 1^{er} mars: le même placard, en faveur du même ouvrage, annonce encore une vente de 95 000 exemplaires. Quant à nous, lec-

teurs critiques, livrons-nous à un calcul simple. Pendant les dix jours écoulés entre la parution des deux pubs, M. Peyrefitte a donc vendu 95 000 - 95 000 exemplaires de son ouvrage. Par soustraction, nous trouvons une vente totale de 0 ouvrage, soit - sauf erreur de calcul - une vente moyenne de 0 ouvrage par jour.

Le π phénix

Devinez. Nous étions trois du temps d'Archimède, nous étions vingt à la fin du seizième siècle, six cents au début de ce siècle. Nous sommes aujourd'hui plus de six milliards, et nul ne se hasarderait à prévoir combien nous serons au siècle prochain. Qui sommes-nous?

Réponse. Les décimales connues du nombre π .

L'étude de π confirme une vieille malédiction: plus on est savant, plus le mystère s'épaissit. Pour Archimède, π (qu'on n'appelait pas ainsi) désignait le rapport de la circonférence d'un cercle à son diamètre. Voilà qui était relativement simple. À partir de Newton, π s'est révélé essentiel non plus seulement en géométrie, mais aussi pour calculer des sommes n'ayant rien à voir avec les cercles. Son cas devenait beaucoup moins simple. Aujourd'hui, les informaticiens ont amélioré les algorithmes. Bilan: alors que π est le nombre le plus déterminé qui soit, ses décimales donnent l'impression d'être tirées au sort, chaque chiffre, apparemment, ayant *a priori* une chance sur dix de figurer à une place donnée. Le mystère est devenu total.

Ainsi la nature de π évolue avec nos conceptions. À supposer que le «vrai π » existe quelque part dans le ciel platonicien, rien ne prouve que nous soyons en train de le percer de plus en plus près. Peut-être ne faisons-nous qu'errer d'une conception à une autre. Craignons donc les nouveaux progrès qui nous attendent dans la connaissance de π !

Cherchez six milliards de décimales sert surtout de stimulant pour améliorer les algorithmes. Quant à π lui-même, «connaître 40 décimales serait largement suffisant pour calculer la circonférence de la Voie lactée avec une erreur inférieure à la taille d'un proton». Cette formule est due à des informaticiens. Preuve que, quoi qu'en pensent les esprits chagrins, on peut avoir le goût des chiffres et savoir exprimer sa pensée de façon saisissante.

Précision inutile

Les meilleures choses peuvent commencer mal. Ainsi en est-il de *La bosse des math*, de Stanislas Dehaene (Odile Jacob, 1997). Ce livre bien écrit, qui allie agréablement les remarques astucieuses aux réflexions plus théoriques issues d'observations expérimentales, explique en quoi notre cerveau est peu adapté au calcul mental. N'avez aucune honte si calculer de tête vous donne du mal: c'est effectivement un exercice difficile.

Mais quel est le problème? Écrivez les lignes suivantes en avant-propos! «En entamant l'écriture de ce livre, je me suis posé le petit problème suivant: si ce livre doit faire environ deux cent cinquante pages et comprendre neuf chapitres, combien chaque chapitre comportera-t-il de pages? Il m'a fallu cinq bonnes secondes de réflexion pour parvenir à la conclusion qu'il y aurait un peu moins d'une trentaine de pages par chapitre. Cinq secondes... une éternité par rapport à ma calculatrice électronique qui, non contente de me répondre immédiatement, me fournit un résultat exact jusqu'à dix décimales: 21,1111111111. Quelques décimales sont tellement inférieurs aux ordinateurs sur le plan du calcul mental? Et comment parvenons-nous à une excellente approximation sans faire le calcul exact, ce dont une calculatrice demeure incapable?»

Désolé: nous sommes supérieurs. Il faut être bête comme une calculatrice pour mesurer un nombre de pages à 10^{-10} près. Il vaut mieux attendre cinq secondes, et obtenir un résultat approximatif - le seul intelligent, c'est-à-dire adapté au problème.

France Culture
et
Pour la Science

vous invitent
au Palais
de la découverte
à l'enregistrement
des

Inattendus
de la
Science

Samedi 10 mai 97
à 15 h

Les inattendus
en climatologie

avec Jean-Claude Duplessy,
directeur du Centre des
faibles radio-activités

Invitations à demander au
08 36 68 10 99



Palais de la découverte

POUR LA
SCIENCE

JEU-CONCOURS

PIERRE TOUGNE

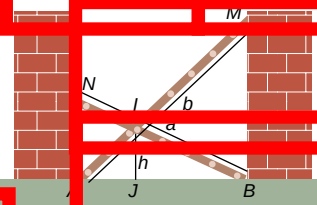
N° 35

LE PROBLÈME DES ÉCHELLES

Deux échelles de longueur $AM = a$ et $BM = b$ ($a \neq b$) s'appuient sur deux murs parallèles qui se rencontrent à une hauteur h (voir la figure 1). Trouvez la distance AB des deux murs ? Ce problème dont on ne connaît pas l'origine était très en vogue au début du siècle, car à ma connaissance sa solution ne peut éviter la résolution numérique d'une équation du quatrième degré, ce qui n'est guère agréable ! De nos jours, toute calculatrice programmable peut résoudre cette

équation et le problème a perdu de son intérêt.

Si vous êtes un peu plus curieux, vous pouvez proposer de construire un problème de ce type de telle sorte qu'il puisse se résoudre «manuellement». Tout d'abord, a et b étant donnés pour que les valeurs de h le problème est-il possible ? Pour $a = 119$ et $b = 70$, quelle valeur entière de h doit-on choisir pour que les longueurs AB , AM et BM soient aussi entières, et quelles sont ces valeurs ?

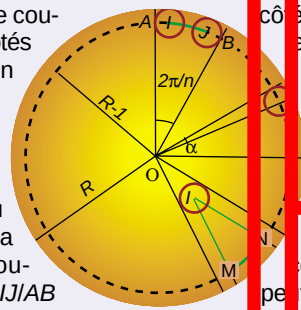


Envoyez vos réponses aux questions
à **Pour la Science**, 8, rue Férou, 75006
Paris. Parmi les réponses exactes
reçues pendant le mois de mai 1997
dans un tirage au sort recevront le
livre *La vie dans les Abysses*.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N°33

Une galette de rayon R étant découpée en n parts égales, chaque part est un secteur d'angle $2\pi/n$ en radian. Considérons la part contenant la fève de rayon 1 dont le centre est situé sur l'arc de cercle de rayon $R-1$. Elle ne sera pas coupée par le couteau (représenté par les côtés du secteur) que si son centre est situé sur l'arc IJ où I et J sont les centres des cercles de rayon 1 tangents au cercle de rayon R et aux côtés du secteur (voir la figure). La probabilité de ne pas couper la fève est donc $p = IJ/AB = (2\pi n - 2\alpha)/(2\pi n) = 1 - \alpha/\pi$. Or, dans le triangle rectangle OJB , $\sin \alpha = 1/(R-1)$, d'où $p = 1 - (n/\pi) \arcsin(1/(R-1))$. Pour $R = 20$ et $n = 10$, on a $p = 0,8324$, soit à peu près cinq chances sur six. D'autre part, si l'on veut que cette probabilité soit égale à 0,9, on doit avoir $\arcsin(1/(R-1)) = \pi/100$, soit $R = 1 + 1/\sin(\pi/100) = 32,84$ centimètres. Le calcul de la probabilité moyenne dans

le cas d'une fève placée au hasard dans la galette peut se faire analytiquement, mais j'ai préféré l'approche géométrique suivante. Soit la portion d'angle $2\pi/n$ contenant la fève et I le centre du cercle de rayon 1 tangent aux deux côtés du secteur. Par I , on trace les deux demi-droites parallèles aux côtés du secteur qui coupent le cercle de rayon $R-1$ en M et N (voir la figure 2). Le triangle curviligne IMN est le lieu des



centres de fèves qui ne seront pas coupés par le couteau. D'autre part, la fève peut avoir son centre dans le triangle curviligne OAB . La probabilité moyenne est donc $p_m = \text{aire}(IMN)/\text{aire}(OAB)$. Un calcul géométrique simple donne :

$$p_m = 1 - (n/\pi) (\arcsin(1/(R-1)) - \sin(\pi/n) / (R-1))$$

Pour $R = 20$ et $n = 10$, on trouve $p_m = 0,69223$ qui est bien sûr inférieure à celle que l'obtient en plaçant sur la périphérie, mais de relativement peu.

Les deux marchés : Walras et Keynes

CHRISTIAN WALTER

Les progrès de l'informatique et la volonté de gestion à court terme des titres incitent investisseurs et gestionnaires au mimétisme.

Dans la conception des marchés de l'économiste Léon Walras, les individus tendent à optimiser indépendamment un objectif de satisfaction spécifique, sans se préoccuper de l'attitude du voisin. L'individu observe la nature (extérieure au marché) pour acheter ou vendre. La nature est l'entreprise, l'économie réelle. Dans un tel système, pas de place pour l'imitation : l'investisseur walrasien est un solitaire au comportement «rationnel». Un personnage mythique, le héraut (ou commissaire-priseur) assure l'équilibre entre les offres et les demandes de titres.

Ainsi, dans cette optique, les investisseurs privés achetaient autrefois des actions ou des obligations pour les conserver : c'était le placement de «père de famille». Ces investisseurs s'intéressaient au rendement à long terme de leurs titres : les coupons obligataires ou les dividendes des actions. Les variations des cours boursiers, selon cette perspective, ne résultent que des variations des dividendes futurs escomptés, issus des aléas naturels, qui affectent la vie réelle des entreprises ou de l'économie. Les détenteurs de titres ne réagissent qu'en fonction des

aléas qui modifient la valeur des entreprises. Tout va donc bien sous le meilleur des mondes financiers possibles.

Voilà... Les intervenants sont-ils véritablement indépendants? Ne cèdent-ils pas à la pression psychologique du marché, selon laquelle des comportements de foule viennent perturber la «juste» évaluation des titres? Peuvent-ils rester longtemps acheteurs quand l'ensemble du marché baisse? L'histoire boursière montre combien il est difficile d'avoir raison, seul contre le marché.

La gestion moderne de l'épargne incite les gestionnaires de titres à des réactions mimétiques fondées sur les fluctuations du marché. Les possibilités de traitement informatique permettent aujourd'hui l'évaluation quotidienne des titres. Des centaines de milliers de porteurs de parts se préoccupent-ils au jour le jour de leur investissement : aussi les investisseurs s'intéressent-ils moins au rendement à long terme des titres qu'à la performance à court terme du capital.

Les détenteurs d'épargne sont très sensibles aux performances périodiques des Sicav, n'hésitant pas à vendre une Sicav qu'ils estiment insuffisamment per-

formante pour en acheter une autre, à la performance meilleure. Ce faisant, des quantités considérables d'épargne se déplacent rapidement en fonction des résultats de ces classements périodiques. Ces facteurs obligent les gérants de portefeuille à rechercher sans cesse la meilleure performance pour essayer de stabiliser leurs actifs gérés. D'où un abandon relatif d'une gestion à long terme des actions, la recherche de la performance relative ou comparative, à acquis plus d'importance que la recherche de la rentabilité à long terme.

Imaginons un gestionnaire de portefeuille qui anticipe une hausse des titres et achète des actions. S'il est certain de son système de prévision, il va acheter des titres sans se soucier de ce que font les autres gérants. Mais il ne peut être absolument certain de ses prévisions : il subsiste toujours une incertitude. Si le marché baisse, qu'en va faire le gérant?

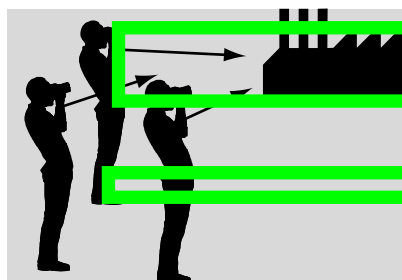
RECHERCHE DE CONFIANCE ET MIMÉTISME

Sous l'influence des classements des performances des fonds gérés, le gestionnaire aura tendance à imiter les comportements d'autres gérants et perdra confiance dans son propre système de prévision. Plus le marché persiste dans un mouvement contraire à l'anticipation du gérant, plus l'anticipation de celui-ci sera sujette à rétrogradation, et plus il aura tendance à adopter une attitude mimétique par rapport à ses confrères. Mieux vaut se tromper avec tous que d'avoir raison seul contre tous, mais trop tard : après la date du fatidique classement des performances des Sicav. La psychologie du marché acquiert alors autant d'importance que la prévision des dividendes futurs.

L'investisseur professionnel a l'obligation impérieuse d'anticiper les changements prochains dans l'ambiance et l'information ; il recherche la maximisation de la performance comparative. D'où un comportement spéculatif : la spéculation keynésienne consiste à «prévoir la psychologie du marché» dans le but de réaliser une plus-value à court terme, et non d'obtenir un rendement à long terme. L'attitude spéculative revient donc à observer non la nature réelle du monde extérieur au marché (attitude de l'investisseur), mais le marché lui-même. Les gérants recherchent les paramètres qui agissent sur le comportement de leurs confrères... Cette attitude entraîne l'émergence de bulles spéculatives.

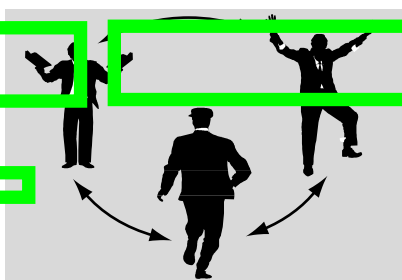
Finalement, avant d'acheter une action, faut-il estimer son dividende futur, ou deviner ce que son voisin pense de ce même dividende?

Le marché d'investisseurs walrasiens



La seule information pertinente pour l'achat ou la vente de titres est exogène : elle concerne la «nature», l'économie réelle.

Le marché de spéculateurs keynésiens



L'information pertinente est endogène : elle porte sur le comportement des autres opérateurs et non plus sur la «nature».



Le coût du patrimoine

JEAN-PAUL DEMOULE

Les responsables politiques imposeront-ils aux aménageurs le paiement des fouilles lorsqu'ils détruisent des vestiges archéologiques ?

Le 17 janvier 1997, un promoteur immobilier entreprenait de raser, sous la protection de clôtures et de vigiles, et avec l'appui d'une lettre du Premier ministre, une partie de la vieille ville médiévale et gauloise de Rodez. Immédiatement, les services de l'archéologie se mobilisent en grève, occupant plusieurs locaux administratifs. Des manifestations étaient organisées ; l'une d'elles, le 29 janvier, rassembla à Paris plus d'un millier d'archéologues professionnels, tandis qu'une conférence de presse était tenue le 4 février par des personnalités du Collège de France, du CNRS et des universités.

Finalement le ministre de la Culture interrompit les travaux de Rodez et les fouilles reprenaient. Puis il annonçait la tenue d'un grand débat national qui rassemblera les scientifiques et les aménageurs sur l'archéologie. Ce débat devrait déboucher sur une loi avant la fin de cette année.

L'affaire de Rodez révélait au public une situation juridique inextricable : la loi interdit de détruire le patrimoine archéologique. Mais elle ne précise pas qui doit payer les fouilles quand des nécessités économiques imposent la destruction d'un site. Lorsqu'il s'agit de grands travaux publics au budget élevé (autoroutes, TGV), on prévoit les opérations de repérage et de fouille des sites éventuels, opérations dont le budget dépasse rarement un pour-cent du coût total des travaux et dont le prix est répercuté à l'utilisateur. Les repérages et les fouilles sont exécutés par les archéologues d'une agence liée au ministère de la Culture, l'Association pour les fouilles archéologiques nationales, qui emploie environ 2 000 personnes, à temps plein ou partiel, et gère un budget de 400 millions de francs.

Lorsqu'il s'agit de promoteurs privés, la procédure peut s'enrayer. Cer-

tains peuvent être tentés de passer outre, même si le coût des fouilles dépasse rarement cinq pour-cent de leur budget total. Certes, plusieurs textes de loi interdisent la destruction de la partie de sites archéologiques, dont la Convention européenne de Malte, ratifiée par la France, qui oblige les États membres à protéger leur patrimoine archéologique, mais ces textes restent muets quant aux moyens à mettre en œuvre pour assurer cette protection.

PRESSIONS POLITIQUES LOCALES

La capacité des services de l'État à faire respecter la loi peut dépendre d'un rapport de force politique local. D'autant qu'avec la décentralisation, les services archéologiques sont placés sous l'étroite tutelle des préfets, souvent plus sensibles à l'influence d'agents économiques parfois liés au pouvoir politique local, qu'aux réclamations d'un service archéologique qui ne compte que 250 personnes pour toute la France ! Ainsi, à Toulouse ou à Épinal, les services archéologiques ont-ils été mis discrètement à l'écart de zones archéologiquement sensibles.

Le cas de Rodez était plus grave, car il pouvait créer un précédent : par l'intermédiaire d'un adjoint au maire, le promoteur avait obtenu une lettre, mal informée, du Premier ministre lui-même l'autorisant à détruire « sans crainte d'être poursuivi ». De fait, dans les jours qui suivirent, élus locaux et préfets commencent à s'attarder d'une « jurisprudence Rodez » pour tenter de passer en force dans plusieurs dossiers sensibles – à Carcassonne, dans l'Aisne, dans les Ardennes, etc. –, d'où la réaction particulièrement virulente du milieu archéologique et la rédaction peu après d'instructions très fermes du ministre de la Culture destinées aux préfets.

Le « débat national », préalable au projet de loi, doit donc s'ouvrir, sous formes d'assises régionales, puis nationales. Que peut-on en attendre de nouveau ? En 20 ans, près d'une vingtaine de rapports ont été commandés par les Premiers ministres ou les ministres de la Culture successifs. Les termes du débat et les solutions sont donc parfaitement connus. Il paraît raisonnable que les aménageurs prennent en charge le coût des fouilles nécessitées par leurs projets, à charge pour l'État de constituer un fonds de compensation pour les « petits » aménageurs – particulièrement construisant sa maison ou cultivant et irriguant ses terres. Un principe analogue où « les pollueurs sont les payeurs » s'est imposé depuis quelques années dans le droit de l'environnement.

Quant à la réalisation des fouilles, il s'agit de stabiliser l'Association pour les fouilles archéologiques nationales et de la doter d'un statut d'établissement public, même si certaines fouilles peuvent être réalisées par d'autres partenaires (CNRS, universités, services archéologiques des collectivités). La création d'un tel établissement, du type de l'Office national des sports, est en effet seule capable d'assurer une continuité dans la recherche archéologique. Dans beaucoup d'autres pays, la préservation du patrimoine est du ressort exclusif de l'État. Ici le mode ni le traité de Maastricht ne poussent vers la fonctionnarisation des personnels de l'association ; pourtant il faudrait-il pas que leur compétence puisse s'exercer dans la durée et qu'ils puissent publier les découvertes ? L'archéologie ne se réduit pas à libérer des terrains pour les aménageurs en restant des objets en saisisse.

La tentation ultralibérale d'imaginer une concurrence entre de multiples bureaux d'études privés a parfois été envisagée : aux États-Unis, où elle a été tentée dans les années 1970, elle s'est pourtant soldée par un gâchis financier et scientifique accablant. La fouille est une opération de recherche qui ne peut relever de critères commerciaux.

C'est donc avant tout une volonté politique que requiert désormais l'archéologie, et cela seulement. Ainsi se justifiait déjà le rapport sur l'archéologie remis par Christian Goudineau, professeur au Collège de France, à la demande du Premier ministre de l'époque, il y a... sept ans.

Jean-Paul DEMOULE est professeur d'archéologie à l'Université Paris I.

Les inattendus en neurophysiologie

HENRI KORN

Si le comportement animal est déterminé par la présence de gènes, les capacités d'expression de ces gènes sont le fruit de l'apprentissage.

Le cerveau est associé à «l'intelligence» puisqu'il est le siège de la pensée. Le cerveau humain est le plus développé et le plus riche en neurones : aussi l'homme a-t-il pu étudier le fonctionnement de son propre organe. Un premier inattendu apparaît aussitôt : c'est en se penchant sur le système nerveux d'animaux moins développés – mollusques, insectes, poissons, petits mammifères – que nous comprenons en quoi le nôtre est singulier. À condition, cependant, que nous ayons préalablement établi dans quelle mesure notre cerveau partage, avec ces animaux, des mécanismes et des règles de fonctionnement irréductibles et communs.

Les expériences modernes ont été réalisées par le neurochirurgien canadien Penfield, qui désirait localiser des foyers épileptiques en vue de les exciser à des fins thérapeutiques. Le cortex étant insensible, ce protocole était acceptable. Pour cela, Penfield soumettait les patients, conscients et éveillés, à des stimulations électriques du cortex. Les réactions à ces stimulations prenaient souvent la forme de «flash-back», de souvenirs.

Deux formes de mémoires sont distinguées. L'une, dite explicite, est consciente : c'est le cas d'une formule mathématique, d'une référence bibliographique. Elle dépend de facteurs cognitifs tels que l'évaluation des faits et leur comparaison avec d'autres épisodes, l'élaboration d'un schéma mental.

La seconde, dite implicite, est telle que la formation du langage commun. Elle résulte de l'activité de deux régions cérébrales, le lobe temporal, lui-même relié à l'hippocampe, situé en regard, et qui semble être un intermédiaire obligé.

pour la mise en place de la mémoire à long terme. Toute information provenant des autres régions du cortex serait envoyée dans l'hippocampe, y serait traitée et reviendrait dans ces régions pour y être définitivement emmagasinée. Les phénomènes cellulaires qui se déroulent dans l'hippocampe, une sorte de gare de triage, servent de modèle expérimental et de métaphore pour la mémoire à long terme.

La mémoire de second type est implicite, c'est celle qui amène un geste réflexe ou l'utilisation, automatique, de règles de grammaire. Elle ne fait pas intervenir le langage ou la conscience. Elle porte sur des événements simples ou complexes, sans que le sujet se souvienne jamais qu'il les a vécus. De nombreuses régions cérébrales coopèrent lors de ce processus. Cette mémoire implicite est accessible à l'expérimentation directe, laquelle, pour des raisons éthiques évidentes, n'est pas effectuée sur l'homme.

Les conditions d'apparition et de mise en jeu rappellent ces deux formes de mémoire. Elles sont liées à des réseaux d'écarts qui ont des ramifications entre les neurones, les dénommées synapses. Les principes de base du «langage» des neurones, le fonctionnement du système nerveux et les modifications intervenant lors de l'apprentissage sont indiqués dans l'encadré de la page 22.

LA COMMUNICATION NEURONALE

Les neurones, les cellules du cerveau sont des entités séparées et, dans les grandes lignes, étonnamment identiques dès qu'apparaissent les formes les plus simples de la vie.

Contrairement à une idée commune, la transmission de l'information par la synapse n'est pas garantie : elle est régie par les lois du hasard. À chaque mécanisme de transmission est associée une probabilité, la probabilité d'émission des neuromédiateurs par les neurones qui «s'expriment» lorsqu'ils sont sollicités par l'influx, la probabilité de diffusion dans la fente synaptique, la probabilité d'interactions entre les neuromédiateurs et leurs protéines de réception situées sur les neurones qui «reçoivent», la probabilité d'ouverture des canaux ioniques associés à ces récepteurs.

Le «hasard principal» est celui de l'émission des neuromédiateurs. Chaque signal électrique, ou réponse postsynaptique, est composé par un nombre variable d'unités de base ou «quanta» d'amplitude égale. Chaque quantum, ou signal miniature, correspond à l'ouverture d'une des vésicules synaptiques. D'un influx à l'autre, l'amplitude du potentiel synaptique varie,

La mémoire

Depuis le siècle dernier, les neurologues savent que les déficiences du fonctionnement cérébral s'accompagnent souvent de déficits de la mémoire. Une des premières

L'animal «supérieur»?

Supérieur à qui? Aux animaux? Avant Darwin, l'homme est d'une autre essence. Après, il n'est qu'un animal ayant évolué différemment. Aussi Darwin nous a-t-il conjuré de «ne pas aller au-delà des termes supérieur et inférieur». Il a écrit, dans un autre de ses cahiers : «Il est absurde de parler d'un animal plus élevé qu'un autre. Nous considérons tout comme la structure cérébrale (les facultés intellectuelles) est la plus développée comme plus haute que les autres. Mais une abeille le serait, si les instincts étaient pris comme critère.» L'évolution portait atteinte au concept d'inéluctabilité des progrès vers un but fixé par un Créateur.

Darwin n'a pas opposé l'adaptation, celle de l'adaptation. L'adaptation est un dispositif qui permet à la fois de saisir les occasions génétiques et de diriger le hasard vers des voies compatibles avec la vie dans un milieu donné. Ces deux termes, «occasions génétiques» et «hasard» seront au cœur des études qui seront conduites au ^{xx}e siècle sur le cerveau.

L'apprentissage et la mémoire sont des propriétés de toute la matière vivante, depuis les invertébrés jusqu'à l'homme. Ils ne sont l'apanage d'aucune espèce particulière : tout organisme vivant apprend.



du fait que 1, 2, 3... n de ces unités ont été libérées simultanément. Ce maximum, n , correspond au nombre de zones d'émissions «actives» établies par chaque neurone sur sa cible. Chacune de ces zones de stimulation émet donc un quantum selon un mode binaire, avec une probabilité p . Cette loi a été découverte dans mon laboratoire.

La valeur des différentes probabilités est mesurée par l'analyse statistique. Il existe même dans le cerveau des synapses silencieuses ($p = 0$) que mobilisera, si le cas se présente, un protocole d'appoint.

Ainsi il existe des lois de fonctionnement du système nerveux régissant la mémorisation et l'apprentissage, car le neurone modifie de plusieurs manières sa force synaptique : il l'accroît en modifiant la probabilité du nombre de vésicules présynaptiques vidées, ou encore le nombre des récepteurs postsynaptiques ouverts après une libération.

La variabilité de ces lois amène richesse et diversité, dans la mesure où les grands faits évoqués ici diffèrent d'une espèce à l'autre, à l'intérieur d'une structure cérébrale, et d'un neurone à l'autre au sein d'une population donnée. Chaque neurone du cerveau est plus singulier qu'on ne l'avait jamais supposé. Cette individualisation porte de plus sur la nature des récepteurs exprimés en telle ou telle région du neurone ; c'est la structure de ce récepteur qui détermine la forme et la durée des signaux reçus et traités. Les terminaisons de l'axone contiennent plusieurs

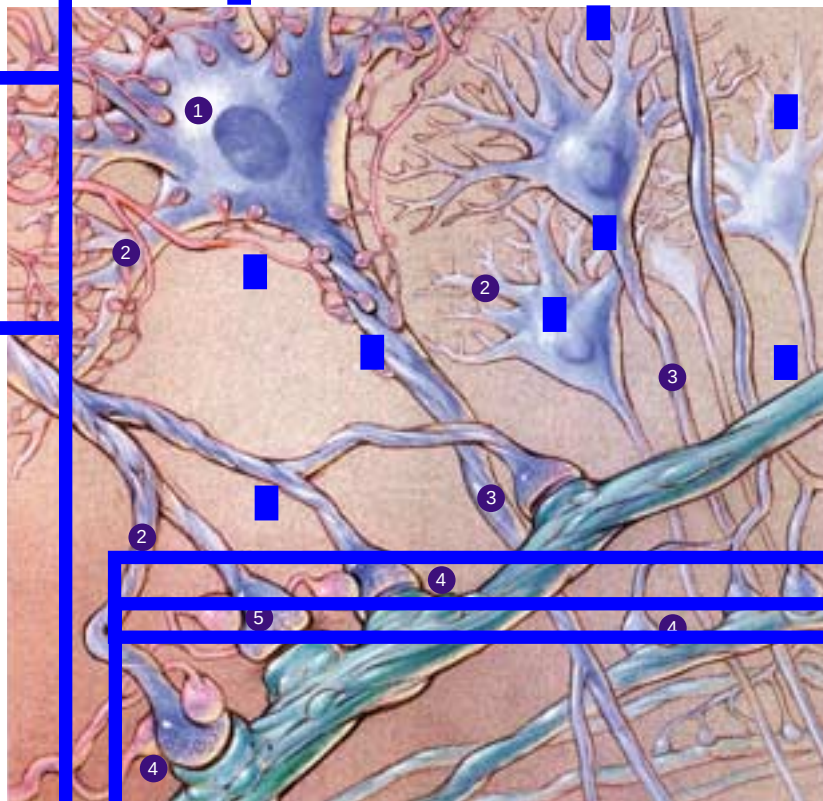
stances libérées, selon des modalités diverses et spécifiques. Ces singularités confèrent aux neurones une spécificité de fonction, spécificité qui s'accroît avec le degré de complexité du système nerveux, et qui est maximale chez l'homme.

LE SYSTÈME NERVEUX EST-IL IMMUEBLE ?

On a longtemps pensé que le système nerveux était intangible. Dès qu'il est constitué, pensait-on, le cerveau était une structure fixée une fois pour toutes, et qui commençait à mourir dès l'adolescence. Les neurophysiologistes ont montré que cette vue était inexacte.

Les communications du cerveau sont l'aboutissement d'un long processus qui se déroule lors du développement. Il existe, au cours des stades précoces de la vie, un nombre plus élevé encore de synapses que le chiffre astronomique de 10^{14} du cerveau adulte. Cette phase, dite de redondance, est suivie d'une période de régression, puis de stabilisation des synapses restantes, et cette per-

Les communications des neurones



Le système nerveux est composé de neurones. Chacun de ces neurones est constitué par un corps cellulaire (1) de quelques micromètres qui émet des prolongements plus fins, les dendrites (2), et un axone (3). Les dendrites reçoivent essentiellement des messages en provenance des neurones voisins. L'axone suit un long trajet et finit par s'articuler en fin de course, par l'intermédiaire de ses ramifications terminales, à d'autres cellules nerveuses.

L'élément clef de la communication nerveuse est la synapse (4). La synapse, la zone spécialisée associant les terminaisons axonales du neurone présynaptique (celui qui «parle»)

avec les dendrites du neurone de la cellule postsynaptique (celle qui «écoute»). Chaque terminaison de l'axone contient une multitude de petites vésicules (5) où sont stockées des substances chimiques, les neuromédiateurs, et des régions spécialisées où ces vésicules s'accumulent. Excitées, les vésicules déversent leur contenu, les neuromédiateurs, dans la fente sous-synaptique.

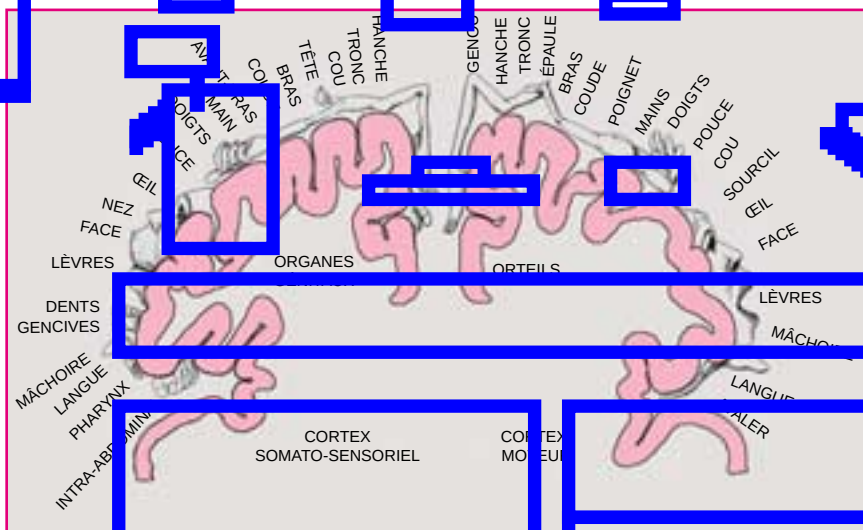
Les médiateurs libérés vont se lier avec des protéines spécialisées, les récepteurs canaux postsynaptiques. À la suite de cette liaison, des canaux s'ouvrent un bref instant pendant lequel ils laissent passer des ions à travers la membrane ; ce flux ionique donne naissance à un courant qui restaure le message nerveux interrompu jusque-là par la forte résistance électrique de la synapse.

L'extraordinaire complexité des opérations de transfert dont le cerveau humain est l'objet est illustrée par quelques chiffres : le cerveau contient environ 100 milliards de neurones, dont chacun reçoit en moyenne 20 000 synapses, soit 20^4 à 10^5 , nombre supérieur à celui des étoiles présentes dans notre Galaxie.

Ces synapses couvrent la totalité du neurone, et leur fonction peut être excitatrice ou inhibitrice, selon la polarité des courants que produit le neuromédiateur qu'elles libèrent.

Ces courants, de l'ordre de quelques microampères, peuvent être enregistrés à l'aide de microélectrodes de verre remplies d'un liquide conducteur, dont la pointe est assez fine pour qu'ils puissent être insérés à l'intérieur même des neurones. Ces micro-électrodesregistrent des courants positifs ou négatifs selon que sont activées des synapses excitatrices ou inhibitrices. Ces courants convergent vers une région du neurone où ils s'additionnent.

La région privilégiée où s'effectue cette intégration émet à son tour (ou non) un influx. Cet influx dont l'amplitude est de 100 mV et la durée une milliseconde, se propage le long de l'axone ; après en avoir atteint les terminaisons, il déclenche l'émission de neuromédiateurs, et ainsi de suite, d'un neurone à l'autre.



Homonculus cérébral où se projettent les parties du corps. Les neurophysiologistes ont observé que la taille des aires du cortex correspondant à un organe dépend de l'apprentissage de celui-ci : très exercé, un organe est représenté par une aire plus grande.

sistance résulte d'une interaction entre les axones et leurs cibles : l'activité électrique des neurones déclenche l'émission d'un signal en retour, qui renforce les jonctions les plus actives tandis que les autres disparaissent.

Mais tout ne reste pas en l'état : une analyse plus fine des mécanismes physiologiques a établi que les dendrites des neurones sont porteuses de petites protubérances, appelées épines dendritiques. La taille de ces épines est modifiée par l'apprentissage, et certaines espèces peuvent, de préférence, des jonctions nouvelles lors de celui-ci.

LE POUVOIR DES GÈNES

Il est néanmoins indubitable que les gènes ont le pouvoir de changer la connectivité et donc de modifier certains comportements. Plusieurs preuves confirment le pouvoir déterminant des gènes.

L'un est l'impact des mutations géniques, par exemple sur le cervelet de la souris : les mutations de certains gènes provoquent des lésions caractéristiques de certains neurones et synapses, et toutes s'accompagnent de troubles marqués et définitifs de la locomotion.

Examinons un autre exemple : la programmation génétique des rythmes biologiques présents chez tous les animaux. Chez l'homme, on a isolé le produit du gène dénommé *period* (ou *per*) contrôle les rythmes physiologiques de la mouche (dont le cycle est de 24 heures) et la fréquence du battement des ailes du mâle, lorsque celui-ci fait sa cour. Ces battements se répètent toutes les 55 secondes et durent 10 secondes. Chez les mutants ayant un cycle circadien plus court ou plus

long, l'intervalle des battements est réduit ou accru, et les vibrations sont totalement arythmiques chez la mouche qui a perdu tout repère circadien.

Cependant, l'identification des gènes produisant des molécules «spécialisées» dans la rétention et la réactivation des traces mnémoniques est rendue difficile par la forme élevée de gènes impliqués dans ces processus ; de plus, des mécanismes de compensation sont mis en place lorsque des mutations ponctuelles sont produites expérimentalement. Enfin, les gènes codent des substances ayant des rôles multiples, et il est très difficile de déterminer lesquelles agissent spécifiquement dans la mise en place de la mémoire à long terme.

D'autre part, des facteurs liés à l'activité et à l'expérience du sujet sont également déterminants pour la construction et pour l'activité du cerveau.

L'APPRENTISSAGE

Les circuits et les synapses qui composent le système nerveux sont constamment modifiés par l'apprentissage.

On trouve déjà chez un mollusque marin, *Aplysie*, toutes les formes d'apprentissage implicite décrites chez les mammifères par Pavlov. Ce mollusque a un système nerveux composé d'environ 20 000 neurones, et ceux-ci déclenchent des réflexes de défense tels que le retrait des branchies, provoqué par un choc tactile appliqué sur la queue. Ce réflexe diminue d'amplitude après des chocs répétés (habituation), ou au contraire devient plus marqué si les stimulations redeviennent intenses (sensitisation). Dès qu'il est établi, ce conditionnement peut persister plusieurs semaines.

Ces modifications du comportement sont déterminées par le nombre des neurones agissants et par les variations de l'efficacité des synapses entre les neurones sensoriels et les motoneurones qui contrôlent les muscles.

Le modèle expérimental de «mémoire» cellulaire le plus étudié aujourd'hui est la potentialisation à long terme. Pour l'étudier, on découpe des tranches d'une structure corticale, l'hippocampe de mammifères que nous avons mentionné plus haut. Sur ces tranches maintenues en survie, on étudie les modifications de l'efficacité des synapses sous l'effet des mêmes «conditions» que celles qui sont efficaces chez l'animal entier.

La potentialisation à long terme consiste en un accroissement prolongé de l'efficacité des synapses à la suite de stimulations électriques par des trains d'impulsions à hautes fréquences (100-200 hertz), appelées tétaniques. Les synapses mises par une voie soumise à un tel protocole deviennent plus efficaces pendant des heures, parfois des jours, voire pendant plusieurs semaines, et cette activation peut toucher des jonctions peu actives, voire silencieuses.

Les propriétés de la potentialisation à long terme sont celles que l'on attend d'un processus de mémorisation. Elle est coopérative : la mise en jeu de deux voies, l'une faible et l'autre forte, a pour conséquence de renforcer la première. Elle est associative : deux voies distinctes se renforcent l'une l'autre lors de telles manipulations expérimentales. Enfin, elle est spécifique des voies activées et ne touche pas les jonctions voisines de celles qui ont été effectivement tétanisées.

La potentialisation à long terme n'est pas l'appariement des synapses excitatrices. Cette forme de mémoire est également présente dans les jonctions inhibitrices, comme l'ont montré d'abord dans mon laboratoire les recherches effectuées sur un neurone de poisson, la cellule de Mauthner, qui commande le réflexe de fuite en direction opposée à un signal menaçant auditif par exemple. Cette plasticité a été retrouvée sur d'autres synapses inhibitrices, tels le cervelet et le cortex des mammifères. Cet exemple illustre comment sont effectuées certaines recherches sur le cerveau : elles sont d'abord effectuées sur des préparations «simples» (ici le poisson), puis la généralité évènementielle des observations initiales est vérifiée sur des espèces plus complexes, tels des mammifères ou des primates.

La potentialisation à long terme a été identifiée dans presque toutes les structures centrales. Sa mise en jeu est due à l'entrée de calcium dans la cellule

cible, mais son maintien est généralement provoqué par une substance rétrograde, qui diffuse en retour, à partir du neurone qui «écoute» vers celui «qui parle», et qui provoque l'augmentation de la probabilité de libération des transmetteurs, voire le recrutement des synapses préalablement silencieuses. Ici se dessine à nouveau une analogie entre développement et apprentissage.

Les propriétés de la synapse sont à long terme d'importance capitale. Une loi énoncée en 1949 par le psychologue américain Hebb, selon laquelle le pivot de l'apprentissage est synaptique et que cet apprentissage nécessite l'activation conjointe des deux versants de la synapse.

PLASTICITÉ DU CORTEX CÉRÉBRAL

Nous pouvons maintenant évoquer l'aptitude du cortex cérébral, siège des fonctions appelées cognitives chez l'homme, à se modifier en fonction de différentes expériences.

Il existe au cours du développement, des périodes critiques qui sont déterminantes pour l'apprentissage d'une fonction : celle-ci peut être abolie sans retour possible si elle n'est pas exercée durant cette période. Cette propriété du système nerveux est particulièrement marquée au cours des premiers âges de la vie. Ainsi un chaton dont l'un des yeux a été obturé pendant une semaine choisie durant la période critique qui va de la naissance à l'âge de six mois, perd la vision stéréoscopique. La presque totalité des cellules corticales n'est sensible qu'au seul influx transmis par l'œil resté ouvert.

Chez l'adulte, les organes des sens se projettent sur des régions précises du cerveau. Sur ces régions, des cartographies précises du corps ont été identifiées en plaçant, lors de stimulations appropriées de la peau, une électrode sur la surface du cortex. Toute la surface du corps est représentée, mais elle est déformée et elle semble grotesque. L'importance de la surface périphérique représentée sur le cortex est un reflet de la vie sensorielle, qui varie en fonction de l'espèce : le museau et les moustaches dominent chez le chat, la queue et la face chez le singe, la main et les régions orales chez l'homme. Ces cartes diffèrent d'un individu à l'autre en fonction de son expérience. Ainsi chez le singe, la zone de représentation de la main a tendance à se réduire si les doigts ont été mis au repos, ou si les nerfs périphériques ont été sectionnés. Inversement, à la suite d'un apprentissage durant lequel l'animal a été encouragé

Cerveau et société

Un des arguments en faveur de la hiérarchie sociale provient, implicitement, de la sociobiologie comparée, qui s'appuie par exemple sur l'observation des insectes sociaux. Selon une définition qui témoigne d'une vision anthropomorphique, il existerait dans les sociétés d'insectes sociaux, tels que des fourmis, des «castes», dont chacune est spécialisée à partir d'une tâche définie : ouvriers, soldats, esclaves capturés dans d'autres colonies, sans oublier la reine.

Or ce qu'il conviendrait mieux de nommer groupes spécialisés n'est pas seulement déterminé par des facteurs génétiques, mais par de nombreux autres éléments : nourriture, taille (aléatoire) de l'œuf, conditions d'hivernation et posthivernales de sa maturation, présence ou non d'une reine dans l'entourage des larves, ainsi que son âge. Plus important encore : les œufs ayant un long cycle de couveuse peuvent devenir soit reine, soit ouvrier, et la reine peut rester longtemps multipotente, puisqu'elle peut effectuer, durant une longue période, les mêmes tâches qu'un ouvrier.

Des lors, si chez les êtres simples le comportement est fortement déterminé par les gènes, le programme génétique devient, du fait de sa diversité de plus en plus large, plus «ouvert» chez les organismes plus complexes. Il laisse à ceux-ci capacité de choix et liberté de réponse, apportant des potentialités qu'il pourra développer ou non, selon les hasards de la vie et de l'éducation qu'il aura reçue. C'est ce que disait déjà Lamarck en 1809 dans sa *Philosophie zoologique* : «On peut sans doute apporter en naissant les dispositions particulières pour des penchants que les parents transmettent par l'organisation, mais certes si l'on n'eût pas exercé fortement et habituellement les facultés que ces dispositions favorisent, l'organe particulier qui en exécute les actes ne se serait pas développé.»

Une seconde question porte sur les «maladies mentales». Un scientisme excessif et des raisons idéologiques pourraient généraliser le sens d'observations importantes, mais encore très fragmentaires sur le rôle de l'hérédité lors de certaines affections psychiatriques. Certes la psychose maniaco-dépressive est d'origine génétique, mais une conclusion semblable concernant toutes les formes d'autisme ou d'affections graves sur le plan social serait prématurée. Il n'est pas possible d'exclure l'intervention de facteurs psychologiques dans leur déclenchement, ou leur maintien.

Une troisième question fort débattue touche à la place de l'homme et des groupes humains dans la société. Certains parlent de «Darwinisme social» sans savoir qu'il s'agit là d'un consensus. En effet, c'est Lamarck qui pensait que les formes simples de la vie progressent selon une hiérarchie allant du simple au complexe pour aboutir finalement à la race humaine. En ajoutant la lutte pour la survie chère à Spencer qui était philosophe, et non pas biologiste, on obtient ce qui aurait dû être appelé plus justement un Lamarckisme social. Au contraire, Darwin concevait l'évolution comme un arbre à ramifications multiples, qui a illustré à nouveau en 1937 le principe de la sélection (1859) et non pas comme une échelle. On voit sur cet arbre que les espèces évoluent de manière divergente, en fonction de variations fortuites, et que subsistent celles qui sont le mieux adaptées aux conditions de vie. Ceux qui prétendent trouver appui sur le Darwinisme et plus généralement sur quelques acquis scientifiques isolés de son contexte pour justifier les inégalités sociales et parfois même le racisme, trichent sur les arguments qu'ils mettent en avant. C'est le contraire que nous enseigne chacune des avancées de la science.

à utiliser les doigts médians, on constate que leur aire de représentation s'est étendue par rapport à celle d'animal non contrôlé.

Ces faits montrent combien le système nerveux est sensible à son environnement et non seulement aux âges précoces de la vie. Cet inattendu est rassurant, il souligne le caractère dépassé du vieux débat entre l'inné et l'acquis, comme le rappelle François Jacob dans *Le jeu des possibles*. L'adaptation, dit-

il, est le résultat d'un «dialogue permanent entre les gènes et le milieu environnemental, entre les facteurs biologiques et culturels».

Les neurosciences pourraient elles évaluer l'impact de l'éducation et de la sélection des talents ? Pas grand-chose de plus que ne dictent déjà les grands principes chers aux humanistes et que les avancées de la génétique ne remettent pas en cause. Et c'est très bien ainsi.

Henri Korn est Directeur de recherches à l'INSERM et Professeur à l'Institut Pasteur.

Ce texte est une retranscription du débat enregistré, avec Émile Noël, au Palais de la Découverte. Ce débat sera diffusé sur France-Culture le 7 mai 1997.

La cuisson

HERVE THIS

Comment déterminer les temps de cuisson pour conserver une viande tendre et juteuse.

Voici un rôti de bœuf : comment le cuisons-nous ? Le problème est ancien ; dans sa *Physiologie du goût*, Jean Anthelme Brillat-Savarin montrait un «professeur» morigénant son cuisinier à propos d'une sole ratée : «Ce malheur vous arriva pour avoir négligé la théorie dont vous ne sentez pas toute l'importance... vous êtes un peu spirituel, et j'ai de la peine à vous faire concevoir que les phénomènes qui se passent dans votre laboratoire ne sont autre chose que l'exécution des lois éternelles de la nature ; et que certaines choses que vous faites sans attention, et seulement parce que vous les avez vues faire à d'autres, n'en dérivent pas moins des plus hautes abstractions de la science.»

Quelles sont ces lois qui président aux diverses méthodes de cuisson ? Si l'on écarte quelques cas exotiques, telle la cuisson à l'acide des poissons à la Tahitienne (les poissons sont mis à mariner dans du jus de citron vert), le cuisinier gagnera à reconnaître que la cuisson est une transformation des aliments par la chaleur. D'où la question : comment transmettre cette chaleur ? Classiquement les cuisinières et cuisiniers chauffent les aliments par l'intermédiaire de gaz, de liquides ou d'ondes. Examinons ici une des trois gammes de procédés : le chauffage par des gaz, c'est-à-dire le fumage, le séchage, le braisage, la cuisson au four ou la cuisson à la vapeur.

Dans le séchage comme dans le fumage, la cuisson est lente, car la température du fluide chaud est peu supérieure à la température ambiante. La cuisson à la vapeur est plus efficace, car l'aliment reçoit à la fois l'énergie cinétique de la vapeur et l'énergie résultant de la condensation de la vapeur sur l'aliment ; toutefois, la température est alors limitée à 100 degrés environ. Au four, en revanche, l'air, éventuellement chargé de vapeur d'eau, atteint des températures élevées : d'où des problèmes de détermination des temps de cuisson que les cuisinières et cuisiniers ont résolu empiriquement, par des formules du type : «douze minutes par livre, plus dix minutes pour le pot». Ces règles ont-elles un fondement ? Remarquons tout d'abord que c'est l'épaisseur maximale d'un aliment qui détermine le temps nécessaire pour

que sa température soit partout supérieure à une température donnée. Aussi une saucisse d'un kilomètre de longueur mettra le même temps à cuire qu'une saucisse de seulement dix centimètres de long, pourvu que les diamètres soient égaux.

D'autre part, un doublement de l'épaisseur doit s'accompagner d'un quadruplement du temps de cuisson, parce que la distance à chauffer est doublée, ainsi que la quantité de matière. Pour un corps sphérique, le temps de cuisson est alors proportionnel à la racine 2/3 de la masse,



Braisière française du début du siècle, en terre. Les rebords du couvercle permettent de retenir les braises.

variation qui se modélise bien par une courbe comportant une partie linéaire après une augmentation rapide : on retrouve approximativement la loi empirique, inapplicable aux aliments trop petits.

Également assuré par un gaz chaud, le braisage à l'ancienne est une opération remarquable, puisque, après la destruction des micro-organismes de surface au cours d'un brunissement à haute température, la viande est enfermée dans une enceinte (classiquement une braisière, aujourd'hui une cocotte) et laissée «cendre dessus et cuire dessous», servant les bons auteurs. Ainsi la température du fluide chauffant, inférieure à 100 °C, évapore l'alcool éthylique du bœuf de nos jours employé dans les braisés, ainsi que divers composés aromatiques de la garniture : la viande cuit dans une atmosphère parfumée, sans perdre son eau, puisque la température est inférieure aux 100 °C fatidiques de l'ébullition.

Ce procédé est aujourd'hui à la mode dans de nombreux restaurants, où il est nommé «cuisson sous vide à basse tem-

pérature». Les aliments sont scellés dans un sac et en plastique d'où l'on a retiré l'air, et plongés à une température inférieure à 100 °C. La cuisson est longue, comme pour les braisés anciens, mais elle permet de préparer les plats à l'avance. Cet avantage était si bien connu des chefs anciens que l'on mentionne l'auteur d'une *Science du Maître d'Hôtel Cuisinier* (1750) ne mentionne aucun temps de cuisson dans son traité : il savait que le résultat ne change pas notablement tant que la cuisson est douce. De surcroît, les aliments sont alors d'une remarquable tendreté, car les sucs des viandes ne sont pas évaporés ; or la jutosité contribue à la tendreté.

Jadis difficile (on craignait les «coups de feu»), le braisage donne aujourd'hui de remarquables résultats pourvu qu'on utilise un four préalablement calibré et qu'on connaisse quelques températures clefs : à 40 °C, la viande s'opacifie, parce que les protéines de la viande commencent à se dénaturer (les protéines sont de longues molécules repliées en pelote ; leur déroulement, avant la coagulation, est la dénaturation) ; puis, à 50 °C, les fibres commencent à se contracter ; à 55 °C, la partie fibreuse de la myosine (une protéine essentielle à la contraction musculaire avec l'actine) coagule tandis que le collagène (une protéine qui donne aux viandes leur dureté) commence à se dissoudre ; à 66 °C, diverses protéines coagulent ; à 70 °C, la myoglobine ne fixe plus l'oxygène, et l'intérieur de la viande devient rose ; à 79 °C, l'actine coagule ; à 80 °C, les parois cellulaires sont rompues et la viande devient grise ; à 100 °C, l'eau est évaporée ; et, à une température supérieure à 150 °C les réactions chimiques, dites de Maillard, engendrent des produits bruns et aromatiques.

Que faire de ces repères ? Si le four dispose d'une bonne régulation de température, le cuisinier pourra choisir le point exact de cuisson qu'il voudra atteindre, sans se reposer sur des indications empiriques peu fiables et sans craindre les coups de feu qui ruinaient jadis les braisés. Naturellement la viande saignante a ses adeptes, mais ceux-ci n'oublieront pas que de trop basses températures favorisent la prolifération de micro-organismes dangereux. La cuisson à basse température est périlleuse... mais donne de si bons résultats.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 26 mai 1997, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt

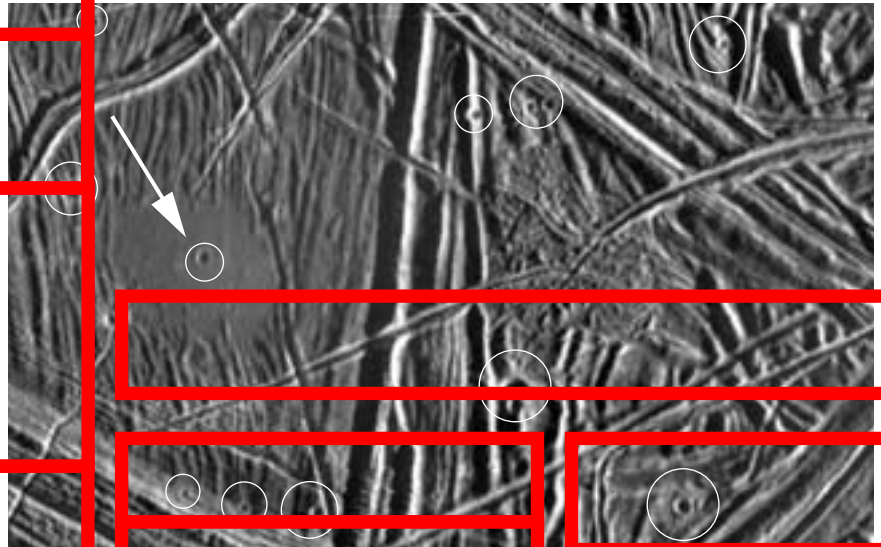
La banquise d'Europe

Sous sa croûte de glace, Europe posséderait un océan.

L'exploration de Jupiter et de ses lunes par la sonde *Galileo* se poursuit. Après avoir révélé la surface de Ganymède l'an passé, *Galileo* a pris au mois de février des images d'Europe, un autre satellite galiléen. On y observe des détails de la surface du satellite et en particulier des plaques de quelques kilomètres qui semblent «flotter» sur un océan.

De même taille que la Lune, Europe est le plus petit des satellites galiléens. En 1979, après son survol à une distance de 200 000 kilomètres par la sonde *Voyager II*, on savait que cette planète était couverte de glace et que les longs filaments sombres visibles étaient probablement des structures géologiques de petite taille, mais on ne distinguait aucun détails entre ces structures sombres.

De surcroît, l'absence de cratères de météorites visibles sur ces premières images indiquait que la surface de cet océan était géologiquement jeune, mais la faible résolution ne permettait pas de savoir si cela signifiait mille ans ou dix mil-



Portion de la surface d'Europe couvrant 13 kilomètres de large sur 18 kilomètres de haut. On distingue plusieurs cratères de météorite. Un disque de trois kilomètres de diamètre (flèche) contraste avec l'enchevêtrement de sillons et de rides visible ailleurs. Ce disque, qui suggère un lac gelé, résulterait d'une inondation de liquide qui a noyé les sillons voisins.

lions d'années. Les nouvelles images, prises le 20 février d'une altitude de 586 kilomètres, détaillent ces filaments.

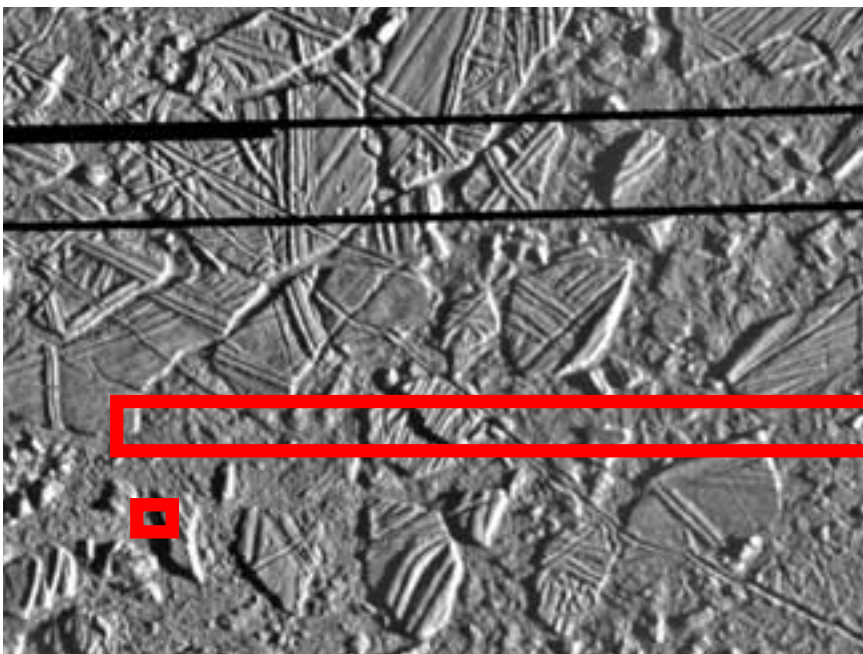
Si les cratères visibles sur l'image du haut sont bien des cratères de météorites, alors les terrains concernés n'ont pas eu d'activité tectonique depuis long-

temps. La surface d'Europe serait alors vieille de plusieurs millions d'années au moins, ce qui reste très jeune comparé aux 4,5 milliards d'années d'Europe.

Lors de sa formation, la planète Europe n'était qu'un gigantesque océan, peut-être recouvert d'une mince couche de glace. L'eau de cet océan provenait de la déshydratation par échauffement des silicates hydratés du noyau, lors de sa formation. À mesure que la planète refroidissait, la couche de glace s'épaississait formant une croûte superficielle. Comment cette glace s'est-elle craquelée pour donner naissance aux réseaux de sillons et de rides visibles sur les images? Soit par dilatation de l'eau en train de geler ou sous l'effet de marées dues à Jupiter.

L'autre surprise vint d'une image révélant des plaques de dix kilomètres qui semblent s'être détachées d'une plaque plus importante. La ressemblance avec des icebergs qui se détachent de la banquise est frappante. Sur quoi «flottent» ces plaques? Elles pourraient être sur de l'eau liquide, mais peut-être aussi sur de la glace molle.

En effet, si, à la surface de la planète, la température de -170°C fait que la glace y est très dure, plus profondément, la température augmente et la viscosité de la glace diminue. Rien encore ne permet de trancher, mais s'il s'agit d'eau liquide, on peut rêver à une vie extra-terrestre. Nos cousins seraient alors des...européens!



Des «icebergs» semblent se détacher de la banquise d'Europe. Ces plaques flottent sur un océan d'eau liquide ou se déplacent sur de la glace molle.

Virus HTLV et migrations humaines

La répartition actuelle de certaines souches virales dans des populations isolées pourrait illustrer l'histoire de leurs migrations.

Les grandes invasions, les expéditions de l'époque des grandes découvertes, les conquêtes coloniales ont véhiculé les microbes, amenant une «unification microbienne du monde». Non sans effets pernecieux. Des maladies locales, souvent bien tolérées par des communautés humaines isolées, ont fait des ravages quand elles ont frappées des populations vierges. Bien plus que les guerres, la colonisation a entraîné des hécatombes, se chiffrant en dizaines de millions de morts.

Le fait que des virus soient restés cantonnés dans certaines populations éloignées des axes de communication, et n'aient pas encore diffusés, a attiré l'attention des anthropobiologistes, qui étudient l'histoire évolutive de l'espèce humaine et sa diffusion sur la Terre. Des biologistes, dont Guy Blaudin de Thé et Antoine Gessain, à l'Institut Pasteur de Paris, et Francis Black, de l'Université Yale, ont émis l'hypothèse que de tels virus pourraient servir de marqueurs des migrations humaines.

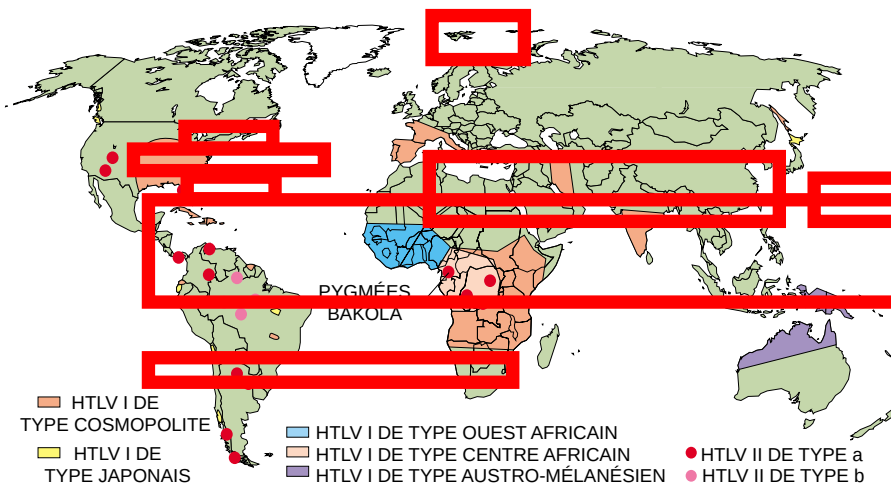
La souche de l'humanité s'enracine dans celle des grands primates africains. Tous les microbes qui infectaient cette souche commune ont circulé entre espèces de primates, par l'intermédiaire d'hôtes ou de vecteurs, ou bien se sont spécialisés par lignées. Ainsi,

l'homme est atteint de maladies spécifiques (variole, poliomyélite, rougeole) que l'on peut espérer éradiquer en vaccinant tous les humains. En revanche, d'autres micro-organismes infectant l'homme sont apparentés à des agents infectant d'autres espèces, et les virus HTLV (*Human T lymphocyte virus*, ou virus des lymphocytes T humains) sont cousins de ceux qui ont été découverts chez le Bonobo, ou chimpanzé d'air, et chez le babouin. Certains virus sont sans doute passés du singe à l'homme par l'intermédiaire de la faune sauvage, celle qui exposait particulièrement les populations de chasseurs.

Dans le domaine des rétrovirus, des virus dont le génome s'intègre à l'ADN cellulaire, les connaissances ont notablement progressé depuis une vingtaine d'années. Les différences de structure ont permis de distinguer les virus HTLV I et HTLV II du virus HIV (responsable du SIDA), nommé HTLV III au début des études. Contrairement au HIV, les HTLV sont stables au cours du temps.

Comme le HIV, tous ces virus infectent les lymphocytes (les cellules sanguines de défense de l'organisme), et se transmettent par transfusion, par des seringues souillées, ou par voie sexuelle. Les HTLV peuvent passer de la mère à l'enfant pendant la grossesse, mais la transmission se fait surtout par l'allaitement. L'infection se transmet de mère en fille et, sauf exception, l'infection ne semble pas réduire l'espérance de vie. Ce groupe de virus se comporte donc un peu comme un marqueur: il se transmet sans intermédiaire de génération en génération, il est stable au cours du temps et il ne tue pas son hôte.

Avec Philippe Mauclère, du Centre Pasteur du Cameroun, et A. Gessain, nous avons analysé un millier de prélèvements sanguins effectués entre 1995 et 1997 sur



Carte de la répartition des virus HTLV I et HTLV II dans les différentes zones d'endémie, établie par Francis Black. D'après cette répartition, le HTLV I aurait été introduit en Amérique du Sud lors de migrations en provenance d'Afrique, mais aussi du Japon par voie transpacifique.

BRÈVES

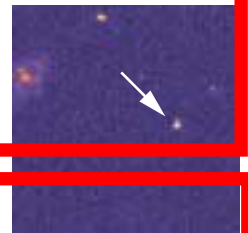
Un écran en braille

Un nouveau dispositif permet aux personnes aveugles de lire le braille sur un écran d'ordinateur. Peu onéreux, cet écran est constitué d'un réseau de cavités remplies d'un gel et recouvert d'un film en élastomère. Lorsqu'une tension est appliquée aux bornes de chaque cavité, le gel gonfle et tend le film qui forme une petite bossa perceptible au toucher.

Sursaut gamma

Depuis une trentaine d'années, les astrophysiciens s'interrogent sur la provenance des sursauts gamma, ces émissions brèves, intenses et localisées de rayons gamma. Le 28 février, le détecteur de rayons gamma du satellite italien BeppoSAX a observé un tel sursaut.

À la précision de la visée de ce télescope, 11 heures après la détection, les télescopes du monde se sont pointés dans la direction du sursaut, juste à temps pour observer sa contrepartie optique, une source faible enfouie dans une «nébulosité» persistante. S'agit-il d'une galaxie?



Rétributions royales

Quels ont été les meilleurs professeurs de la monarchie française? Les mieux payés, du moins, c'est ce qu'on peut dire. Le géomètre et astronome Cassini et Huygens ont été les favoris de Colbert qui souhaitait faire de la modeste «Compagnie de la Bibliothèque du Roi» une Académie des sciences universelle. Sur 643 708 livres de pensions distribuées aux 32 académiciens, Cassini obtint 135 000 livres et Huygens, 81 500.

Méduse bioluminescente

La méduse *Aequorea victoria* devient bioluminescente quand une molécule qu'elle produit, la coelentérazine, interagit avec des ions calcium. Les biologistes utilisent cette molécule comme marqueur biologique des ions calcium dont le rôle est essentiel dans divers mécanismes physiologiques. Pour cela les chimistes ont mis au point une synthèse efficace: les biologistes disposent aujourd'hui de quantités suffisantes de coelentérazine pour mener à bien leurs recherches.

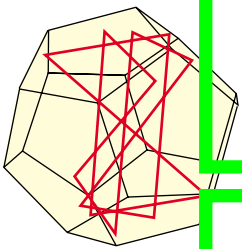
Suite page 20

Défense d'entrer

Après avoir découvert qu'un des récepteurs nécessaires au VIH, le virus du SIDA, pour pénétrer dans les cellules est le récepteur CD4, des immunologistes ont identifié un second récepteur, nommé CCR5. Les individus dépourvus de cette molécule sont immunisés contre le virus. L'idée a donc été de fabriquer une molécule parvenant à condamner cette serrure par une molécule qui en interdirait l'accès au virus, ou éviterait l'infection. Effectivement des biologistes ont synthétisé une molécule, nommée AOP Rantès, qui a une forte affinité pour le récepteur CCR5 et qui empêche le virus de pénétrer dans les cellules *in vitro*.

Billard volumique

Matthew Hudelson, mathématicien à l'Université de l'État de Washington, joue sur des billards théoriques, à trois dimensions. Ces billards sont des polyèdres réguliers (toutes les faces sont identiques). La boule avance en ligne droite, et elle



M. Hudelson a démontré que dans l'octaèdre (huit faces) dans le dodécaèdre (douze faces) et dans l'icosaèdre (vingt faces), il existe au moins une trajectoire où les réflexions successives touchent chacune des faces et ramènent la boule à son point de départ.

Parasite de poisson

Un ver parasite *Anisakis simplex* infecte les poissons, et les amateurs de poisson cru risquent d'être contaminés. Suffit-il de cuire le poisson? Hélas non : on a dénombré plusieurs cas d'allergie aiguës après consommation de poisson contaminé cuit. Ces consommateurs avaient déjà absorbé le ver et fabriqué des anticorps contre les protéines du ver ; en mangeant à nouveau du poisson contaminé — même cuit —, ils ont fait une réaction allergique aiguë. Le nombre de ces allergies a augmenté ces dernières années. Les pêcheurs ont modifié leurs habitudes au lieu de vider les poissons sur le bateau et de jeter les entrailles par dessus bord, ils attendent qu'ils soient à terre. Le parasite, normalement confiné dans le tube digestif, a alors tout loisir de contaminer la chair des poissons. Dans certaines études, 80 pour cent des harengs, des merlans et des colins analysés étaient parasités.

Suite page 22

des Pygmées Bakola du Sud Cameroun : 2,1 pour cent des Pygmées de ce groupe sont porteurs du virus HTLV II et 3,9 pour cent du virus HTLV I. Chez les villageois Bantou de la même région, seul le HTLV I a été détecté (dans un pour cent de la population) mais le HTLV II paraît absent. Les Pygmées d'Afrique Centrale ont la particularité d'héberger de façon endémique à la fois les HTLV I et II : ces virus seraient donc très anciens en Afrique forestière, si l'on admet que les Pygmées en ont été les premiers occupants.

En dehors de ces quelques groupes de Pygmées africains, les seules populations humaines où le virus HTLV II existe à l'état endémique sont certaines ethnies amérindiennes d'Amazonie, où plus de 60 pour cent de la population adulte peut-être infectée ; la prévalence y est notablement supérieure à celle que l'on a trouvée en Afrique. Les HTLV I, beaucoup plus répandus, présentent à côté d'une forme cosmopolite, des variantes spécifiques de certains foyers tels que la Mélanésie, l'Afrique Centrale et le Japon.

Les Amérindiens hébergent deux sous-types distincts d'HTLV II, ce qui pour-

rait indiquer deux vagues de peuplement à partir de l'Ancien Monde. Le HTLV I aurait été apporté par une migration provenant du Japon par la voie transpacifique, avant d'être réintroduit, plus massivement, avec les souches africaines lors de la traite des esclaves. Toutefois, comme une importante immigration japonaise a eu lieu au Brésil et au Pérou depuis le XIX^e siècle, il est difficile de démêler l'histoire de ces transferts microbiens.

Les archéologues, pour qui la colonisation d'Amérique a été faite par le Détroit de Behring, n'admettent guère la réalité d'une migration transpacifique précolombienne ; celle-ci semble pourtant confirmée par la présence de parasites intestinaux tropicaux dans des momies incas. Le cycle de ces parasites est compatible avec un passage des porteurs par les déserts glacés du Détroit de Behring.

Aujourd'hui, une nouvelle branche de l'anthropologie se développe, fondée, sur les acquis les plus récents de la virologie.

Alain FROMENT — ORSTOM
Laboratoire ERMES

Pavillon de l'oreille et acoustique

La présence d'un ressaut sur le pavillon de l'oreille humaine améliorerait la localisation des sons environnants.

Seuls les mammifères sont dotés d'une oreille externe. Leur développement s'est accompagné d'une amélioration des organes de l'audition, facilitant l'analyse des bruits environnants. D'abord constituée d'un simple conduit auditif, elle a évolué chez les singes pour prendre la forme d'une coquille aplatie. Progressivement les bords se sont repétés : ce fut d'abord le bord antérieur, proche de la tempe, puis le bord supérieur et finalement, chez les grands singes et chez l'homme, le bord postérieur du pavillon. Nous venons de montrer que, chez l'homme, un ressaut présent sur le rebord arrière du pavillon améliore l'audition.

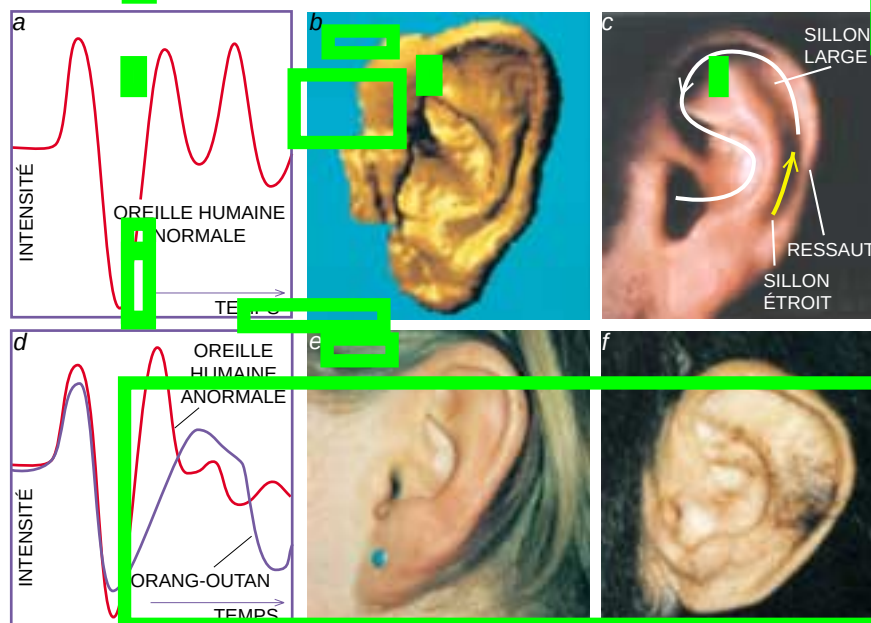
La morphologie du pavillon de l'oreille humaine influe sur la capacité auditive : le son provenant de l'arrière est diffracté par le pavillon de l'oreille différemment de celui provenant de l'avant.

Dans les années 1980, nous avons montré que le pavillon engendre deux

ondes sonores, de sorte que toute onde acoustique atteignant l'oreille est suivie d'une autre, décalée d'environ 0,2 milliseconde (le son se déplaçant à une vitesse de 340 mètres par seconde, ce décalage correspond au temps que met l'onde réfléchi sur le rebord externe de l'oreille à parcourir le sillon avant de pénétrer dans le conduit auditif). Grâce à cette duplication du signal, on repère mieux l'origine du son qu'en comparant seulement les signaux captés par les deux oreilles.

Depuis 1991, nous avons fait plusieurs enregistrements. La personne qui participe à l'expérience, est placée dans une chambre parfaitement silencieuse ; un haut-parleur émet une brève impulsion sonore et un microphone miniature, placé dans le conduit auditif du sujet, y enregistre les signaux sonores. Ce clic engendre, dans le pavillon de l'oreille, un deuxième signal sonore décalé de 0,2 milliseconde par rapport au premier.

En outre, chez les trois quarts des personnes étudiées, nous avons détecté un troisième signal. Afin de découvrir son origine, nous avons élaboré un modèle tridimensionnel d'oreille humaine par ordinateur. Nous avons analysé les réflexions des ondes dans les différentes cavités de notre modèle. Simultanément, nous avons fait des enregistrements sur des personnes qui ne produisaient pas le troisième signal énigmatique. Nous avons



Chez l'homme, une brève impulsion sonore produit trois ondes, correspondant à trois pics sonores dans le conduit auditif (a). Pour comprendre l'origine de ces trois ondes, l'auteur a élaboré sur ordinateur un modèle tridimensionnel d'oreille (b). L'analyse de la propagation du son dans cette oreille a révélé que le deuxième pic sonore provient de la réflexion de l'onde incidente sur un ressaut du bord externe de l'oreille et que le troisième pic est dû à une réflexion supplémentaire sur le fond d'un étroit sillon (c). Ces résultats sont confirmés par les enregistrements effectués sur des personnes dont les oreilles sont dépourvues du ressaut et du sillon étroit (e) et sur des oreilles de singes anthropoïdes (f). Dans ces deux cas, il n'apparaît que deux pics sonores dans le conduit auditif. Le décalage entre le premier et le deuxième pic chez le singe correspond à celui qui sépare le premier et le troisième pic chez l'homme (d).

aussi étudié les pavillons de onze orang-outans et d'imprimés et d'un gorille.

Chez les singes nous avons systématiquement enregistré le deuxième signal, mais jamais de troisième. En revanche, le deuxième pic est décalé par rapport à celui que l'on enregistre chez l'homme. Chez l'homme, le premier signal correspond à l'onde qui pénètre directement dans le conduit auditif. Le deuxième à l'onde réfléchie par un ressaut présent sur le bord externe de l'oreille ; l'onde réfléchie se propage dans le sillon large qui borde l'oreille (voir le cartouche c sur l'illustration). Quant au troisième signal, il correspond à l'onde réfléchie sur le fond du sillon étroit situé sous le ressaut. Les personnes qui ne présentent pas de troisième signal n'ont pas de ressaut sur le bord de l'oreille, ni de sillon étroit.

Le ressaut raccourcit le décalage entre le premier signal et le deuxième (le décalage est plus court que chez les singes anthropoïdes) et il permet à un troisième signal d'être produit. Une audition affinée a-t-elle facilité le déchiffrement des informations ? L'amélioration des performances a-t-elle favorisé l'émergence du langage humain ? En bref, ce ressaut a-t-il été une innovation évolutive favorable pour le genre *Homo* ?

Johann Burchard

Maternité et tolérance

Une molécule qui permet au fœtus de ne pas être rejeté par la mère a été identifiée.

Les greffes sont rejetées quand l'hôte et le donneur ne partagent pas les mêmes « molécules du soi ». Pourquoi un fœtus, qui n'a en commun avec sa mère que la moitié du patrimoine génétique, et qui n'a notamment pas les mêmes molécules du soi, est-il toléré par la mère ? Cette question qui préoccupait les immunologistes depuis longtemps semble être élucidée : Edgardo Carosella, ses collègues du CEA et Jean Dausset, à l'hôpital Saint-Louis, ont isolé une molécule qui confère la tolérance immunologique.

Ces biologistes ont montré que les cellules du trophoblaste portent des molécules du soi spécifiques. Le trophoblaste est l'enveloppe de l'œuf reconstituée qui se niche dans la paroi de l'utérus. Dès les tout premiers jours, les cellules de ce tissu expriment des antigènes HLA-G (ni la mère, ni le fœtus n'en expriment). Cet antigène du soi présente une différence essentielle avec les autres molécules HLA

exprimées tant par la mère que par le fœtus : il n'est quasiment pas polymorphe.

Les molécules du complexe majeur d'histocompatibilité sont caractérisées par leur polymorphisme, c'est-à-dire par leur diversité, laquelle résulte de la recombinaison des gènes codant les molécules HLA de la mère et du père. Le répertoire des molécules HLA d'une personne est sa carte d'identité biologique. Contrairement à ces molécules, la molécule HLA-G n'est quasiment pas polymorphe, c'est-à-dire que l'on ne trouve que deux formes de la protéine HLA-G.

Quel est son rôle ? Elle inhibe un des deux mécanismes du rejet tissulaire. Les acteurs de ces mécanismes sont d'une part les lymphocytes T cytotoxiques, d'autre part les cellules naturelles tueuses. Les lymphocytes T subissent une « éducation » dans le thymus, c'est-à-dire que les cellules reconnaissant les molécules du soi sont éliminées. Les lymphocytes T ne reconnaissent pas HLA-G comme étranger.

En revanche, la molécule HLA-G inhibe l'action des cellules naturelles tueuses. Normalement, ces cellules tueuses éliminent d'abord toutes les cellules qui ne portent pas les antigènes HLA (les HLA-A, B et C à l'exception du

HLA-G). Or, les cellules naturelles tueuses abondent dans l'endomètre maternel, au moment de la nidation de l'œuf, et pourtant elles n'attaquent pas les cellules du trophoblaste qui ne portent pas ces molécules.

L'équipe d'E. Carosella a montré que la molécule HLA-G interagit avec un récepteur porté par les cellules naturelles tueuses, nommé KIR. Afin de prouver que cette interaction inhibe effectivement les cellules naturelles tueuses, ces biologistes ont, d'une part, transfecté des cellules cibles des cellules naturelles tueuses avec le gène *HLA-G* : les cellules transfectées expriment *HLA-G*, ce qui inhibe l'activité des cellules tueuses. D'autre part, ils ont utilisé un anticorps spécifique de la molécule HLA-G qui musèle HLA-G : l'activité des cellules naturelles tueuses est restaurée. Enfin, ces expériences ont permis de démontrer le caractère universel de l'antigène HLA-G.

Ainsi, en rassemblant tous les éléments du puzzle, on peut proposer le schéma suivant pour expliquer la tolérance materno-fœtale : les cellules du trophoblaste expriment, dès que l'œuf s'implante, une molécule universelle, nommée HLA-G. Celle-ci interagit avec un récepteur des cellules naturelles

Criquets envahisseurs

Après le Sud-Ouest, l'Ouest de Madagascar sera bientôt envahi par les criquets migrateurs, qui pèseront sur les ressources alimentaires de l'île pendant plusieurs années. Selon Jean-François Duranton, du CIRAD-GERDAT-PRIFAS, la



depuis quelques années est responsable de l'augmentation progressive des densités de criquets depuis 1991. La dernière invasion généralisée s'est produite entre 1939 et 1947, des actions préventives ayant enrégulé les invasions de 1961 et de 1981.

Empreintes digitales... digitalisées

Les chercheurs du CEA ont mis au point un système de capteurs suffisamment petits pour enregistrer les variations de pression des aux empreintes digitales. Un tel dispositif, où les empreintes sont numérisées, est utilisable comme moyen de reconnaissance de l'individu.

Vers à thé

La production des feuilles de thé de plusieurs plantations indiennes a augmenté de 35 à 240 pour cent grâce à un stimulant naturel. Les vers, qui favorisent l'aération et le drainage. En outre, les vers, nourris de divers résidus organiques enterrés, rejettent près des racines des éléments minéraux nutritifs et, peut-être, des hormones de croissance. Selon des biologistes de l'ORSTOM, les vers réduisent aussi la présence de certains parasites.

Recréer le vivant?

Les chimistes étudient les liposomes, structures sphériques définies par une double couche de molécules, analogue à la membrane des cellules vivantes. Gali Steinberg et ses collègues de l'Université de l'Arizona ont introduit, dans la membrane, des molécules dont la partie centrale capte la lumière, ce qui provoque l'apparition de charges électriques opposées entre les deux extrémités. Cette séparation de charges provoque ensuite, grâce à d'autres molécules placées également dans la membrane, le pompage d'atomes d'hydrogène vers l'intérieur des liposomes; c'est de l'énergie en réserve.

teus sont présentes dans l'endomètre, ce qui les inhibe. La tolérance est ainsi établie pour toute la grossesse.

Ces schémas semblent confirmés par le fait que dans les cas de pré-éclampsie (un rejet brusque du fœtus), le placenta ne présente pas de molécules HLA-G, tandis que les placentas normaux, analysés après une interruption volontaire de grossesse, en possèdent. Lors d'une infection par un herpesvirus, entraînant un avortement spontané, on constate que les molécules HLA-G ne sont pas exprimées à la surface des cellules du trophoblaste.

Quelles sont les applications potentielles de cette découverte? On peut en

imaginer dans les domaines de la stérilité, de la cancérogenèse et des greffes. Ainsi, chez certaines femmes, l'œuf fécondé ne s'implante pas; peut-être l'expression de la protéine HLA-G est-elle alors anormale. On pourra aussi étudier si les cellules tumorales, qui ne sont pas détruites par le système immunitaire, expriment la molécule de tolérance HLA-G. Enfin, cette molécule autorisera peut-être les xénogreffes: des animaux transgéniques, notamment des porcs, qui exprimeront sur toutes leurs cellules la molécule HLA-G humaine, pourraient fournir les organes vitaux qui font tant défaut et qui seraient tolérés par l'homme.

Étranges collisions

De nouvelles particules au-delà des prévisions des physiciens?

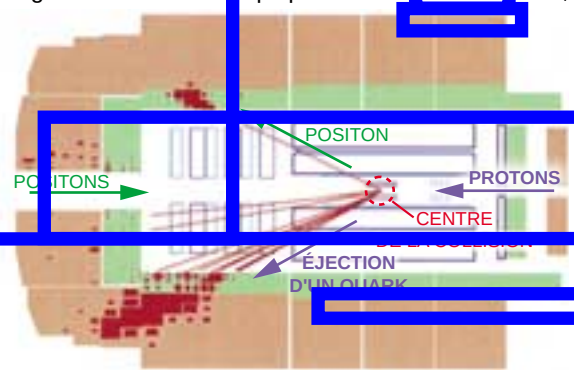
Depuis son élaboration il y a 25 ans, le «modèle standard» de la physique des particules a permis de prédire et de prédire statistiquement toutes les observations expérimentales dans ce domaine. Sera-t-il bientôt englobé dans une nouvelle théorie, plus fondamentale? En provoquant des collisions qui permettent d'explorer un domaine d'énergie inexploré jusqu'à présent, les physiciens qui collaborent aux expériences H1 et ZEUS, auprès du collisionneur HERA à Hambourg, ont observé des événements inattendus, qui, s'il ne s'agit pas d'une fluctuation statistique, témoigneraient de l'existence de particules inconnues dans le modèle standard.

Les expériences H1 et ZEUS envoient l'un contre l'autre des faisceaux de protons et de positons (des anti-électrons). Un positon peut interagir avec un quark (les quarks sont des particules constitutives du proton), dans une collision inélastique. Au cours de cette interaction, un boson qui transporte la force électrofaible, est émis par le positon et pénètre, telle une sonde, dans le proton: sa résolution spatiale est d'autant plus fine que le carré de son énergie-impulsion, noté

Q^2 , est grand. Le positon est ensuite diffusé et le quark est expulsé du proton. Le modèle standard permet de calculer la probabilité de tels événements, ainsi que de prédire les distributions statistiques des variables caractéristiques (énergie, angle...) des particules diffusées.

Les expériences H1 et ZEUS ont observé 24 collisions pour lesquelles Q^2 était supérieur à 15 000 gigaelectronvolts au carré, alors que le modèle standard n'en prévoit que 13,4 en moyenne pour la même énergie d'expériences. En outre, pour sept de ces collisions observées par l'expérience H1, où le positon est fortement rétrodiffusé, l'énergie disponible pour créer de la masse au cours de la collision a une valeur quasi identique, proche de 200 gigaelectronvolts. Selon le modèle standard, on ne devrait observer que 0,95 collision possédant toutes ces caractéristiques.

Entre mars et novembre 1997, le nombre de collisions observées à haute énergie pour analyse devrait permettre de savoir si l'effet observé est dû ou non à une fluctuation statistique. Trois hypothèses expliqueraient les observations,



Dans le collisionneur HERA, un faisceau de proton (venant de droite) rencontre un faisceau de positons (venant de gauche). Les physiciens ont observé un nombre anormalement grand de collisions à haute énergie où un positon est rétrodiffusé: de nouvelles particules interviendraient-elles lors de ces collisions?

sans être en contradiction avec les contraintes expérimentales. Dans la première, les quarks et les positons seraient constitués de particules plus élémentaires, qui favoriseraient les interactions entre les positons et les quarks dans le domaine d'énergie exploré.

Dans la deuxième hypothèse, les collisions auraient créé des bosons leptiquarks, vecteurs d'une nouvelle interaction entre deux familles de particules que le modèle standard distingue fondamentalement, les leptons (électron, muon ou tau) et les quarks. Un électron se transformerait ainsi en quark, et réciproque-

ment! Si cette hypothèse est la bonne, les résultats de l'expérience *H1* laisseraient penser que la masse de ce leptiquark serait de 200 gigaélectronvolts.

Enfin, un autre cadre théorique est proposé : la supersymétrie, qui relie les fermions, constituants de la matière, aux bosons, qui transportent les interactions fondamentales. Dans cette théorie connue, cette théorie associe une superparticule. Les collisions très énergétiques d'héa auraient, pour la première fois, formé des superparticules.

Yves SIROIS, LNPHE - CNRS, E. PEREZ, DAPNIA/SPP - CEA

Fluctuations géantes dans les silos à grains

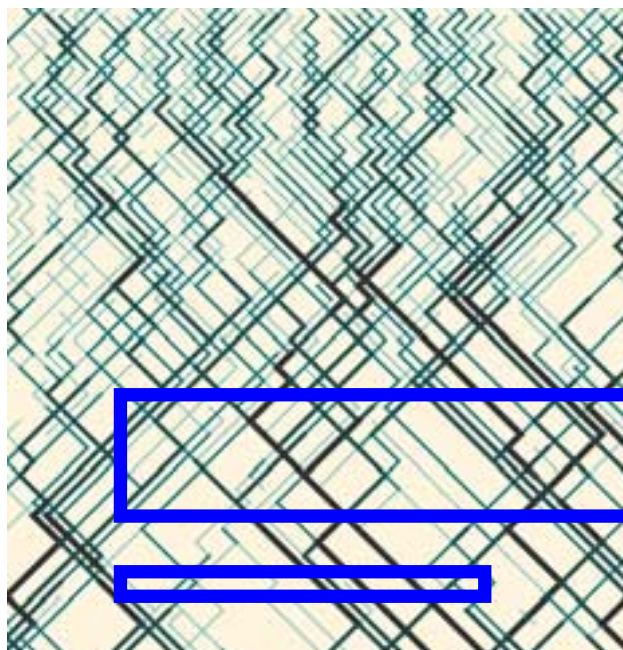
La formation de «voûtes» distribue le poids des grains

Démurge, mi solide, mi liquide, la matière granulaire possède des propriétés étranges dont l'importance pratique est parfois considérable. L'étude de ces propriétés révèle encore des surprises : nous avons proposé un modèle qui explique comment, dans un silo à grains, des petites variations de température peuvent engendrer des fluctuations susceptibles de détruire le silo. La répartition des contraintes dans la matière granulaire a

ses spécificités. Imaginons un tas de sable contenu en laissant s'écouler du sable d'un entonnoir. Sous le tas, plusieurs cellules, qui mesurent la pression locale, sont placées à différentes distances du centre. On observe alors un résultat étonnant : la pression n'est pas maximale au centre du tas, qui est pourtant le point surmonté par la plus grande masse de sable. Au contraire, elle y présente un minimum local, que l'on peut attribuer à un «effet de voûte» qui rejette une partie du poids des grains vers les côtés du tas.

Le mot voûte désigne une structuration de l'empilement des grains qui favorise la propagation des contraintes (en particulier du poids des grains) le long de «chemins» qui se dirigent vers l'extérieur du tas.

Ces chemins ou ces voûtes sont également responsables d'un autre résultat tout aussi surprenant. Prenons un silo et remplissons-le de grains. Une partie du poids de ces grains est «absorbé» par les parois du silo, si bien que le fond du silo ne supporte qu'une fraction du poids total des grains. Ce poids «apparent». Ce phénomène est bien connu depuis plus d'un siècle : le physicien W. Janssen a montré en 1895 que lorsque que l'on remplit un silo de grains, le poids apparent devient quasiment constant dès que la hauteur de grains est supérieure au diamètre du silo.



Dans les silos à grains, des «voûtes» portent une partie du poids des grains. La trajectoire de ces voûtes est modélisée ici pour un empilement de grains donné (plus les lignes sont épaisses, plus les forces qui passent par ces voûtes sont importantes). Le déplacement de quelques grains suffit à modifier les chemins.

En plus de cette saturation, on montre que le poids apparent est sujet à de grandes fluctuations : une perturbation minime, comme une variation de température de quelques dixièmes de degrés (entraînant une petite dilatation des grains), ou la porte du laboratoire qui claque un peu trop fort, peut entraîner une variation du poids apparent de plusieurs pour cent (en plus ou en moins). Bref, dans ces matériaux, de petites causes entraînent de grands effets.

À l'aide d'un modèle simplifié de formation de voûte dans un milieu désordonné, nous avons trouvé l'origine de ces fluctuations. Quelques chemins privilégiés portent une fraction importante du poids total des grains. Or ces chemins passent par les contacts entre les grains, qui se créent et disparaissent aux grés des perturbations extérieures. La trajectoire de ces voûtes, et par suite le poids apparent, fluctuent fortement : il suffit qu'une des voûtes, qui s'appuyait sur la paroi, change de direction et aboutisse après perturbation sur le fond du silo, pour que l'on enregistre une forte hausse du poids apparent. Réciproquement, une voûte qui change de direction et aboutit sur la paroi peut éventrer le silo.

Dans le modèle de formation des voûtes que nous avons proposé, nous trouvons que, sous l'influence de faibles perturbations, les petites fluctuations du poids apparent (0,1 à 0,2 pour cent) sont aussi probables que les grosses (jusqu'à 10 pour cent). On comprend également que si l'on mesure une même quantité (comme le poids apparent) sur différents silos apparemment identiques, la dispersion relative de ces mesures est très grande (10 à 20 pour cent) car d'un silo à l'autre, le réseau des chemins de contrainte est complètement différent.

Les matériaux granulaires sont des systèmes désordonnés qui possèdent un grand nombre de configurations d'équilibre ; de petites perturbations suffisent pour faire passer le système d'une configuration d'équilibre à une autre. En cela, ces matériaux se rapprochent d'autres systèmes désordonnés que les physiciens ont étudiés ces dernières années, (comme les «verres de spin» — matériaux magnétiques désordonnés — par exemple). Une phénoménologie nouvelle les caractérise, où les fluctuations jouent un rôle primordial et où les expériences sont plus difficiles : les résultats deviennent intrinsèquement non reproductibles et doivent être décrits de façon statistique. Cette situation de «chaos» en physique des matériaux est analogue à celle qui prévaut dans tous les systèmes «sensibles aux conditions initiales».

J.-Ph. BOUCHAUD et Ph. CLAUDIN,
Physique de l'état condensée, Saclay

Doutex témoignages

Le travail synthétique des neurones induit de faux souvenirs.

Vous souvenez-vous des circonstances de votre premier amour ? Peut-être pas : les psychologues ont montré que les souvenirs anciens sont altérés. Les conséquences judiciaires des faux témoignages de bonne foi ont suscité de nombreuses études du «syndrome des faux souvenirs».

Ainsi, Henry Roediger et Kathleen McDermott de l'Université de Washington, ont demandé à des volontaires de se souvenir de mots lus dans des listes prédéfinies. Les psychologues ont observé que les personnes testées se souvenaient (pendant au moins un jour) de mots... qui n'avaient jamais été prononcés.

Nous vous proposons une version simplifiée de ce test. Demandez à vos victimes de participer à un test d'apprentissage de cinq minutes, sans leur dévoiler votre but. Choisissez alors trois listes de mots parmi celles inscrites ci-dessous et lisez les mots des listes d'une seule traite, d'une voix neutre, en vous arrêtant quelques secondes entre chaque mot. Ne lisez pas les mots à droite.

Lorsque vous aurez lu les 45 mots, demandez à vos sujets d'écrire, dans l'ordre qu'ils se souviennent. Ajoutez-leur quatre minutes de réflexion et précisez qu'il ne s'agit pas de deviner les mots mais de s'en souvenir. Ramassez les copies et notez combien de mots non prononcés apparaissent dans les réponses.

Dans une étude de ce type portant sur 40 personnes, les psychologues ont

trouvé que chaque volontaire se rappelait correctement moins de 40 pour cent des mots lus. En moyenne, chaque participant prétendait avoir entendu 31 pour cent des mots non prononcés associés à la liste entendue.

K. McDermott et H. Roediger ont recommencé l'expérience en omettant les mots dont leurs cobayes s'étaient souvenus la première fois. Cette seconde chance n'a pas amélioré les résultats, au contraire : les sujets ont incliné encore plus des mots non prononcés.

D'autres psychologues ont fait lire les mots successivement par un homme et par une femme. Les sujets devaient alors répondre à un questionnaire à choix multiples où se trouvaient, rangés aléatoirement, la moitié des mots lus, les mots non prononcés ainsi que d'autres termes sans aucun rapport. Pour chaque mot, les questions étaient les mêmes : avez-vous entendu ce mot et si oui, par un homme, par une femme ou ne savez-vous le dire ? Les résultats furent alarmants : non seulement les personnes interrogées prétendaient souvent avoir entendu un mot non prononcé, mais de plus, ils se rappelaient qui l'avait prétendument prononcé. Plus la liste était longue, plus les sujets se souvenaient des mots cibles non prononcés qui résumaient le thème de la liste.

Comment expliquer ces résultats ? Il est probable que lorsque nous entendons les mots «repos», «somnolence» et «doutex», les neurones de notre cerveau ajoutent automatiquement le mot «sommeil» dans la mémoire. Bien que des mots prononcés sur un ton neutre dans un test de cinq minutes ne possèdent pas la charge affective et temporelle de «faux souvenirs», les psychologues suggèrent que ces résultats s'appliquent à toutes sortes de situations, et expliquent même faux témoignages.

Lisez trois listes parmi les suivantes. Ensuite, vérifiez si vos cobayes se souviennent... ...des mots cibles non prononcés

lit, repos, veillé, fatigué, rêve, veille, assoupi, couverture, somnolence, paisible, ronflement, sieste, repos, paix, bâillent

sommeil

infirmière, malade, avocat, médecine, santé, hôpital, dentiste, médecin, souffrant, patient, cabinet, stéthoscope, chirurgien clinique, cure

docteur

fil, punaise, chat, coque, algues, pain, algues, dé à coudre, épine, écharde, douleur, piqure, seringue, vêtement, tricoter

aiguille

chaud, neige, tiède, hiver, glace, humide, frisquet, transi, chaleur, temps, gel, air, frisson, Arctique, givre

froid

pomme, légume, orange, kiwi, citron, mûr, poire, banane, cerise, panier, jus, fraise, salade, bol, cocktail

fruit

colline, vallée, escalade, sommet, cime, coteau, plaine, pic, glacier, chèvre, vélo, ascension, faite, pente, ski

montagne

Photographie en trois dimensions

La fabrication rapide de maquettes polychromes.

Les concepteurs de produits nouveaux, ingénieurs ou architectes, créent aujourd'hui des objets virtuels à l'aide d'ordinateurs. Grâce aux méthodes de fabrication rapide de prototypes, dont la plus répandue est la stéréophotolithographie, ils transforment leurs idées en maquettes solides qu'ils peuvent manipuler et observer sous tous les angles. Ces maquettes étaient jusqu'à présent monochromes. Nous avons mis au point plusieurs méthodes de fabrication rapide de maquettes polychromes, afin de les rendre plus fonctionnelles : par exemple, les différentes parties d'un objet ou d'un bâtiment sont plus faciles à distinguer.

La stéréophotolithographie permet de fabriquer des prototypes en polymères organiques par couches successives. Un faisceau laser ultraviolet, focalisé à la surface d'un réacteur qui contient un monomère liquide, déclenche la polymérisation en ce point : un petit volume de polymère solide se forme, insoluble dans le monomère liquide. Le faisceau laser est déplacé à l'aide de miroirs pilotés par un ordinateur, et dans le même temps la description de l'objet à fabriquer sous forme de tranches d'épaisseur constante. Lorsque la construction d'une couche est achevée, l'objet est enfoncé dans le bac : il se recouvre d'une couche de monomère liquide, d'épaisseur légèrement inférieure à l'épaisseur de polymérisation pour que les couches adhèrent entre elles, et la couche suivante est polymérisée.

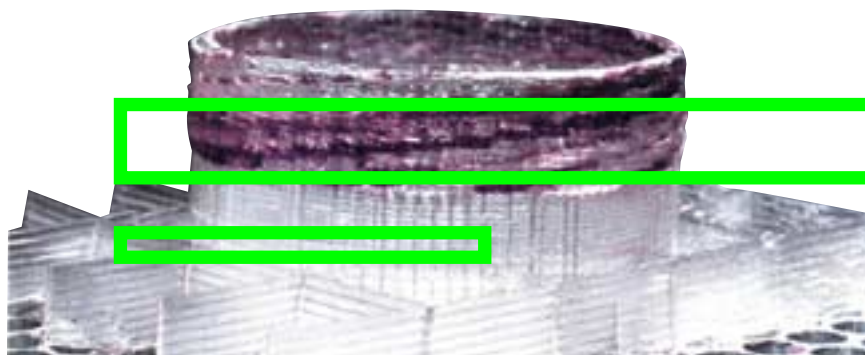
Le premier procédé polychrome que nous avons élaboré utilise plusieurs bacs, qui contiennent chacun le monomère teinté dans l'une des couleurs souhaitées : l'objet en cours de fabrication est suc-

cessivement plongé dans chaque bac, et chaque tranche est fabriquée couleur par couleur. Chaque colorant absorbe différemment le rayonnement ultraviolet. On obtient la même épaisseur de polymère pour toutes les couleurs en ajustant la concentration en colorant, l'épaisseur des couches, et le temps d'irradiation. Un compromis doit être trouvé entre le respect des teintes souhaitées et le temps total nécessaire à la fabrication de l'objet : les changements de bac et les rinçages intermédiaires indispensables l'allongent déjà beaucoup.

Un second procédé est plus rapide, mais il ne permet de fabriquer que des prototypes bicolors, avec des dégradés. Il ne nécessite qu'une seule source laser et qu'un seul bac de résine. Une poudre minérale (dioxyde de titane, séléniure de cadmium ou séléniure de zinc, etc.) et un colorant organique qui s'adsorbe facilement sur ces grains sont ajoutés au monomère. Après la polymérisation d'une tranche, on sort l'objet de la cuve et on irradie plus longtemps les zones qui devront rester colorées. Celles-ci deviennent grasses et opaques : la polymérisation y est plus complète et une plus grande partie de l'oxygène dissous dans la résine est consommée.

Lorsque l'objet est achevé, on l'expose à une source de lumière blanche, à une température de 60 à 70 °C. Les zones normalement irradiées, qui étaient colorées, deviennent blanches : le colorant est dégradé par une réaction photochimique facilitée par la présence d'oxygène. On maintient ensuite l'objet à l'abri de la lumière pendant plusieurs heures, toujours à la même température. Les parties fortement polymérisées retrouvent la couleur initiale du colorant, qui se désorbe de la surface des grains minéraux où il s'était fixé. On «révèle» ainsi une «photographie en trois dimensions».

N. PÉTILLON, J. Y. JÉZÉQUEL
et J. C. ANDRÉ, URA 328 et GdR 1080
CNRS



On fabrique des prototypes par tranches successives en polymérisant de petits volumes de monomère liquide à l'aide d'un laser ultraviolet. En déplaçant l'objet entre plusieurs bacs contenant le monomère teinté en différentes couleurs, on obtient des prototypes polychromes.

Ce qui est écrit

Des écritures révélées sur le suaire de Turin.

Depuis 1578, une grande pièce de lin est conservée dans la cathédrale de Turin. On y distingue des traces brunâtres et l'image, en négatif, du corps va de face et de dos d'un homme nu portant les stigmates de Jésus de Nazareth décrits par les Évangiles. Le tissu a été daté, par la méthode du radiocarbone, entre 1260 et 1390. Ce résultat est toutefois controversé, et l'origine de l'image est inexpliquée. La révélation d'écritures tracées sur ce linceul permettra-t-elle d'en savoir davantage sur ses origines ?

Des traces d'écritures ont été observées, lisibles à l'endroit, sur des négatifs photographiques du linceul. La plupart sont situées sur des bandes qui forment deux L de tailles différentes autour du visage, et qui se superposent à l'image du corps, en l'atténuant. Ces bandes seraient les vestiges d'un enduit déposé sur la face externe du tissu pour le rendre apte à recevoir des peintures.

Ces traces d'écritures sont peu contrastées. En outre, elles sont brouillées par une double trame : celle du linceul, structure régulière en chevrons, et celle de l'image, répétition périodique, sur les crêtes des robes, de minuscules bâtonnets, dont la taille et le niveau de gris variables créent les nuances observées à plus grande échelle.

Nous avons numérisé plusieurs négatifs du visage en utilisant un microdensitométrique, appareil dont la résolution est

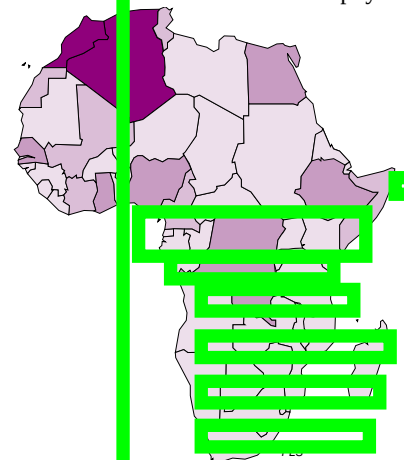
plus fine que les fibres du tissu (100 micromètres sur le drap). Plusieurs numérisations de chaque image ont été réalisées : nous avons fait varier les paramètres d'acquisition afin de recueillir le maximum d'informations à partir d'une même image.

Sur chaque image, nous avons, par interpolation linéaire entre les bâtonnets de chaque crête du tissu, étalé l'information portée par ces derniers, parallèlement à la direction des chevrons. Le même traitement perpendiculairement à la direction des chevrons laisse des creux résiduels, car les chevrons sont plus espacés que les bâtonnets. Nous avons éliminé ces creux en filtrant la fréquence correspondante dans l'espace des fréquences de l'image, obtenu par transformation de Fourier.

Nous avons ensuite calculé la matrice de corrélation entre les différentes images ainsi débarrassées de la double trame.

D'Afrique en Europe

Officiellement, l'Union Européenne compte trois millions d'Africains sur un total de 11 millions d'étrangers non européens : l'Afrique est le premier continent d'origine des immigrés. La communauté la plus nombreuse vient d'Afrique du Nord (deux millions de personnes), mais au Sud du Sahara, l'émigration la plus notable provient d'Afrique de l'Ouest, avec 415 000 personnes. Selon Nelly Robin, de l'Orstom, ces mouvements se sont diversifiés, entre 1985 et 1993, tant pour les pays d'émigration africains que pour les pays d'immigration européens. D'abord orientées principalement vers la France, le Royaume Uni et l'Allemagne, les migrations Ouest-africaines s'étendent aux pays d'Europe du Sud, hier pays d'émigration.

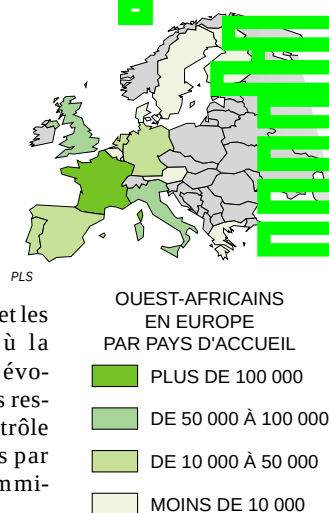


Un tiers des Africains de l'Ouest présent en Union Européenne vivent en France (128 000 personnes) et sont originaires de pays qui lui sont liés par l'histoire et la langue. Second pays d'accueil, le Royaume Uni reçoit 82 000 Ouest-africains, venant surtout de pays du Commonwealth : Nigeria,

migrants Ouest-africains (Sénégal, Gambie, Nigeria, Ghana, Cap-Vert) ainsi que le Portugal, où les Capverdiens sont majoritaires (24 pour cent des africains de ce pays, soit 31 000 personnes).

L'évolution de l'émigration entre 1985 et 1993 partage l'Union Européenne en deux zones : d'une part la France et le Royaume-Uni, où l'immigration se stabilise, d'autre part, les pays scandinaves, l'Allemagne et les pays Sud-européens, où la migration s'accroît. Cette évolution est liée aux mesures restrictives en matière de contrôle des flux migratoires prises par les pays traditionnels d'immigration.

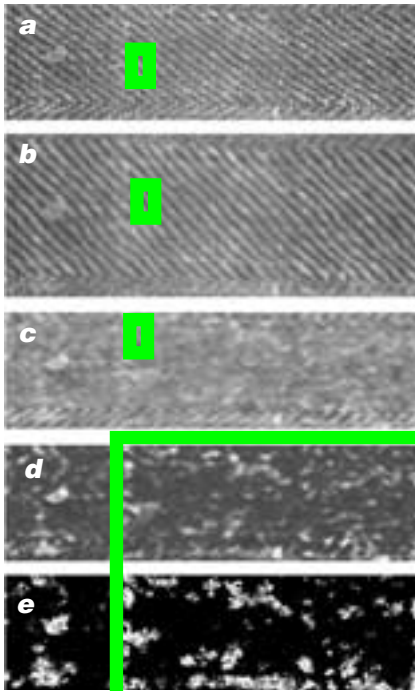
Du côté africain, trois principaux pays d'émigration, le Ghana (80 000 personnes), le Nigeria (120 000 personnes) et le Sénégal (77 000 personnes) fournissent 55 pour cent de la population Ouest-africaine de l'Union Européenne. Viennent ensuite le Cap-Vert (63 000 personnes) et le Mali (39 000 personnes). La Côte-d'Ivoire, qui vient en sixième position avec 21 000 personnes n'était pas un pays d'émigration vers l'Union



L'Allemagne et l'Italie comptent à peu près le même nombre d'Ouest-africains, respectivement 74 000 et 63 000. Au Sud de l'Europe, le long de la Méditerranée, les principaux pays d'accueil sont l'Italie et l'Espagne, caractérisées par une diversité d'origines des

cours des années 1990. Survent plusieurs autres pays qui ont connu des difficultés économiques ou des troubles graves au cours des dernières années : la Sierra Leone, le Togo, la Gambie, la Mauritanie, le Liberia, la République centrafricaine, le Bénin, le Niger et le Burkina Faso voient partir le moins de migrants vers l'Europe. Ils sont en revanche traditionnellement des pays de forte émigration vers les autres pays de l'Afrique de l'Ouest.

Source : Atlas des migrations Ouest-africaines vers l'Europe, ORSTOM ÉDITIONS, 1997



À partir de la numérisation des clichés photographiques du suaire (a), on dilate et on étale parallèlement les lignes des chevrons nets clairs (b). Puis on réalise le même étallement perpendiculairement aux chevrons, on élimine les deux résiduels et on ramène l'image à ses proportions initiales (c). Enfin, on concentre les informations pertinentes de toutes les images ainsi traitées sur une seule (d), à laquelle on applique différents filtres pour faire ressortir les caractères (e), ici les lettres PEZΩ.

La diagonalisation de cette matrice permet de concentrer indépendamment les images afin de concentrer l'information pertinente dans une seule image. Le traitement numérique de cette image, à l'aide de plusieurs filtres agissant directement sur ses points ou sur les fréquences spatiales a enfin été réalisé : adoucissement ou renforcement des contours, élimination de points aberrants, nettoyage du fond, régularisation de la forme des lettres.

Nous avons ainsi révélé, sur la verticale droite du U interne, écrits de bas en haut, les deux mots latins IN NECE, partie sans doute de IN NECEM IBIS, «tu iras à la mort». Sur la verticale gauche du U externe, apparaissent, plus gros, de haut en bas, les caractères grecs ΨΣΚΙΑ. Une interprétation y voit ΟΨΣΚΙΑ qui signifie «ombre de visage», ou «visage à peine visible». Sur la verticale droite du U externe, on lit, de haut en bas, un ensemble de lettres qui pourrait former le mot grec ΝΑΖΑΡΗΝΟΣ, «le Nazareen». L'interprétation de ces inscriptions, ainsi que l'analyse paléographique des caractères, qui semblent davantage antiques que médiévaux, permettront-elles de lever un coin du voile?

André MARION, Institut d'optique, Orsay

Du gène au traitement

WILLIAM KATZ

En identifiant les gènes humains responsables de maladie, les généticiens fabriquent des protéines qui ont des propriétés thérapeutiques potentielles. Des médicaments efficaces contre diverses maladies devraient naître de ces recherches.

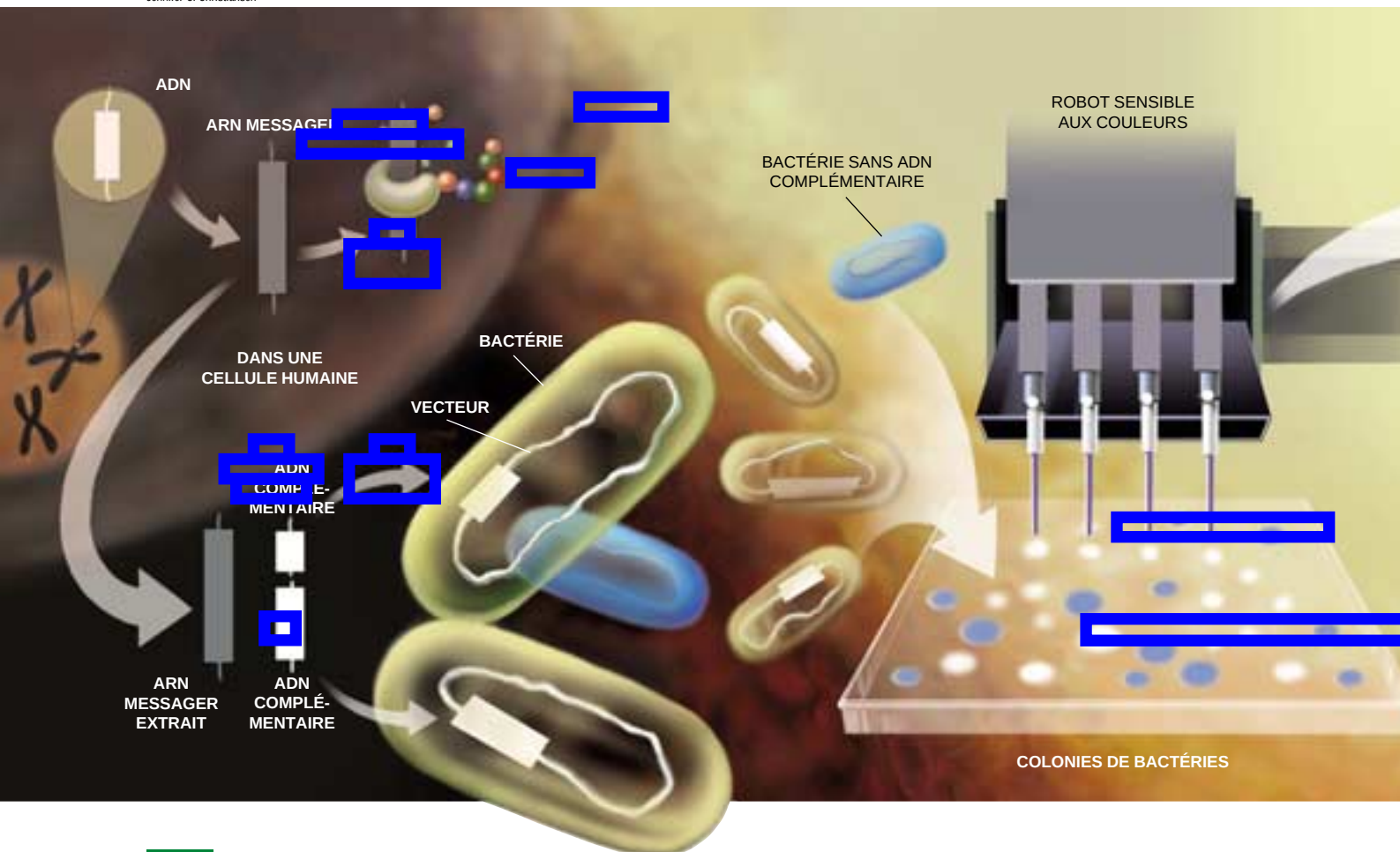
On sait depuis Gregor Mendel (1822-1884) que les gènes transmettent les caractères héréditaires, de génération en génération, et les biologistes ont découvert l'importance des gènes dans les maladies : des gènes défectueux sont à l'origine de nombreuses maladies, et pas uniquement de maladies héréditaires. Le cancer, l'athérosclérose, l'ostéoporose, l'arthrite ou la maladie d'Alzheimer, par exemple, sont caractérisés par des modifications spécifiques de l'ac-

tivité de certains gènes. Même les maladies infectieuses déclenchent souvent l'activation de divers gènes du système immunitaire. De surcroît, une exposition répétée au cours de la vie à des rayonnements ionisants et à certaines molécules entraînerait certaines des modifications liées au vieillissement.

Il y a quelques années, nous avons compris que, si nous découvrions où et quand les divers gènes de l'organisme sont activés, nous saurions mieux prévoir, prévenir, traiter, voire guérir

les maladies. Lorsqu'un gène est actif (les généticiens disent qu'il « s'exprime », la séquence de ses sous-unités, de groupes chimiques nommés bases, sert de modèle pour la fabrication de la protéine qu'il code. Les protéines assurent toutes les fonctions cellulaires : ce sont des éléments de structure, des catalyseurs des différents mécanismes chimiques de la vie, et des éléments de régulation de la reproduction, de la spécialisation cellulaire et de l'activité physiologique. Le déve-

Jennifer C. Christiansen



loppement d'un être humain, de l'œuf fécondé à l'adulte, résulte d'une modification bien orchestrée de l'expression des gènes dans les tissus.

Notre raisonnement était donc le suivant : si nous connaissons les gènes exprimés dans les tissus sains et dans les tissus pathologiques, nous pourrions identifier les protéines nécessaires au bon fonctionnement de ces tissus et les anomalies qui déclenchent les maladies. Nous pourrions alors mettre au point de nouveaux tests diagnostiques et des traitements qui compenseraient l'activité des protéines ou des gènes défectueux.

Peut-on ainsi établir l'anatomie humaine, non plus à l'échelle de l'organe, mais à celle des molécules ? L'identification exhaustive de tous les gènes exprimés dans tous les tissus de l'organisme serait une tâche titanesque : chaque cellule contient quelque 100 000 gènes, et les gènes (environ 15 000) qui s'expriment dans chaque cellule changent d'un type de cellules à l'autre. L'étude d'un ou de deux types cellulaires seulement ne fournirait aucune information sur les gènes exprimés ailleurs. En outre, l'anatomie moléculaire ne serait véritablement connue que

si l'on explorait les tissus aux stades successifs du développement, et le tout aussi bien dans les tissus malades que dans les tissus sains.

Les progrès techniques récents ont rendu cette tâche faisable : les biologistes peuvent trouver rapidement quels sont les gènes exprimés dans n'importe quel tissu. Notre programme s'est révélé le plus rapide pour l'identification de gènes thérapeutiques potentiels.

Prenez l'exemple de l'athérosclérose : au cours de cette maladie, une substance graisseuse s'accumule dans les vaisseaux qui alimentent le cœur. Les techniques que nous avons mises au point procurent une liste des gènes exprimés dans les artères normales, avec une mesure de cette expression pour chaque gène. On peut ensuite comparer cette liste à celle établie chez des personnes atteintes d'athérosclérose : les gènes (et donc les protéines) qui diffèrent entre la personne saine et la personne malade sont responsables de la maladie. On détermine aussi dans quelle mesure la maladie agit sur l'expression de ces gènes.

Connaissant les gènes, on fabrique ensuite les protéines qu'ils codent, et une fois les protéines purifiées, les bio-

logistes préparent des tests pour les doser chez les patients. Un test qui révélerait une production excessive d'une protéine des plaques d'athérome indiquerait une prédisposition à l'athérosclérose, une détection précoce autoriserait un traitement plus efficace. De plus, les pharmacologues pourraient utiliser des protéines purifiées pour trouver de nouveaux médicaments : tout composé inhibant la production d'une protéine de la plaque d'athérome est un médicament potentiel.

Notre méthode est un peu à l'écart des grandes recherches actuelles en génétique humaine. De nombreux scientifiques participent au séquençage du génome humain, une collaboration internationale destinée à établir la séquence complète des bases de l'ADN humain. Ces informations seront essentielles pour l'étude du rôle des gènes et de leur évolution, et pour celle des maladies génétiques. Toutefois, ce séquençage n'est pas le moyen le plus rapide pour décou-

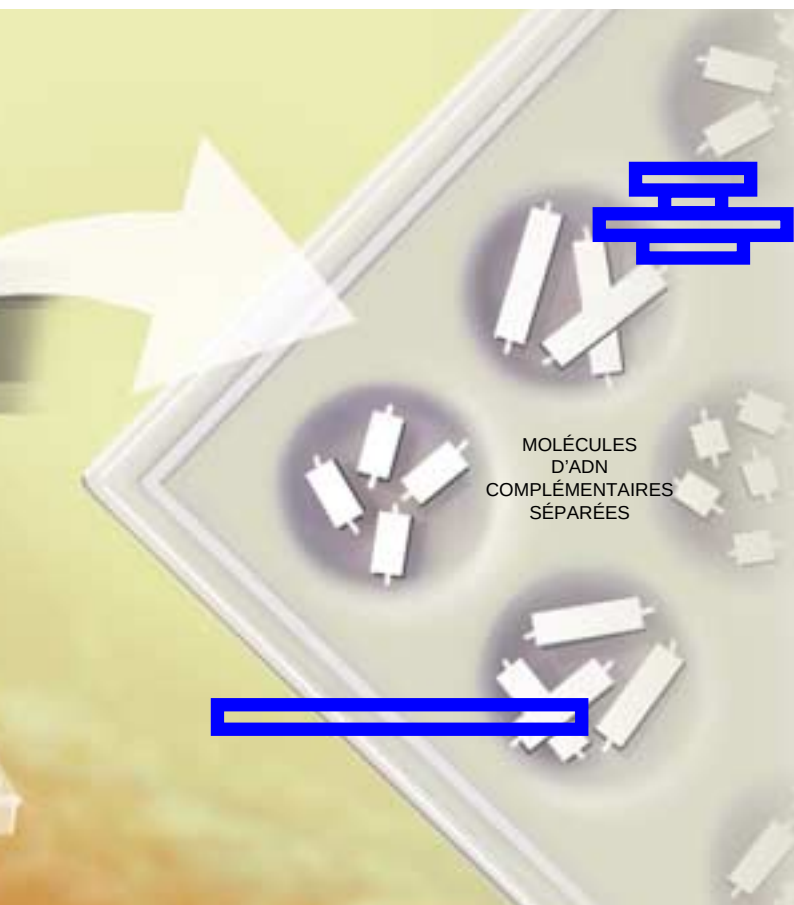
vrir les gènes impliqués dans des maladies. Ils ne nous disent qu'une petite partie de l'ADN. De plus, le programme ne précise pas quels sont les gènes impliqués dans des maladies.

La fabrication des molécules d'ADN complémentaires

Pour fabriquer les protéines, les cellules utilisent des ARN messagers. Pour trouver des gènes, nous n'avons pas utilisé les molécules d'ARN messager, trop fragiles, mais des copies de cet ARN messager, l'ADN complémentaire. Nous les obtenons en mélangeant une molécule d'ARN messager avec des nucléotides (les sous-unités de ces molécules) et une enzyme, la transcriptase inverse, qui recopie l'ARN sous forme d'ADN. Nous obtenons un ADN complémentaire que nous cherchons ensuite à recopier en plusieurs exemplaires, afin de déterminer les bases qui les composent. Les biologistes moléculaires ont mis au point des techniques pour insérer les molécules d'ADN complémentaires dans le génome de bactéries ; étalées sur un gel, elles se multiplient, fabriquant des copies de l'ADN complémentaire intégré.

Puis un robot repère les colonies qui ont effectivement intégré les ADN complémentaires et il les prélève. Le robot reconnaît les colonies par leur couleur : les bactéries qui n'ont pas intégré l'ADN complémentaire produisent un pigment bleu. Le robot prélève chaque jour environ 10 000 colonies bactériennes. L'ADN complémentaire des colonies sélectionnées est assez abondant pour être analysé, puis purifié automatiquement. L'ensemble des molécules d'ADN complémentaire provenant d'un même tissu forme ce que l'on nomme une banque.

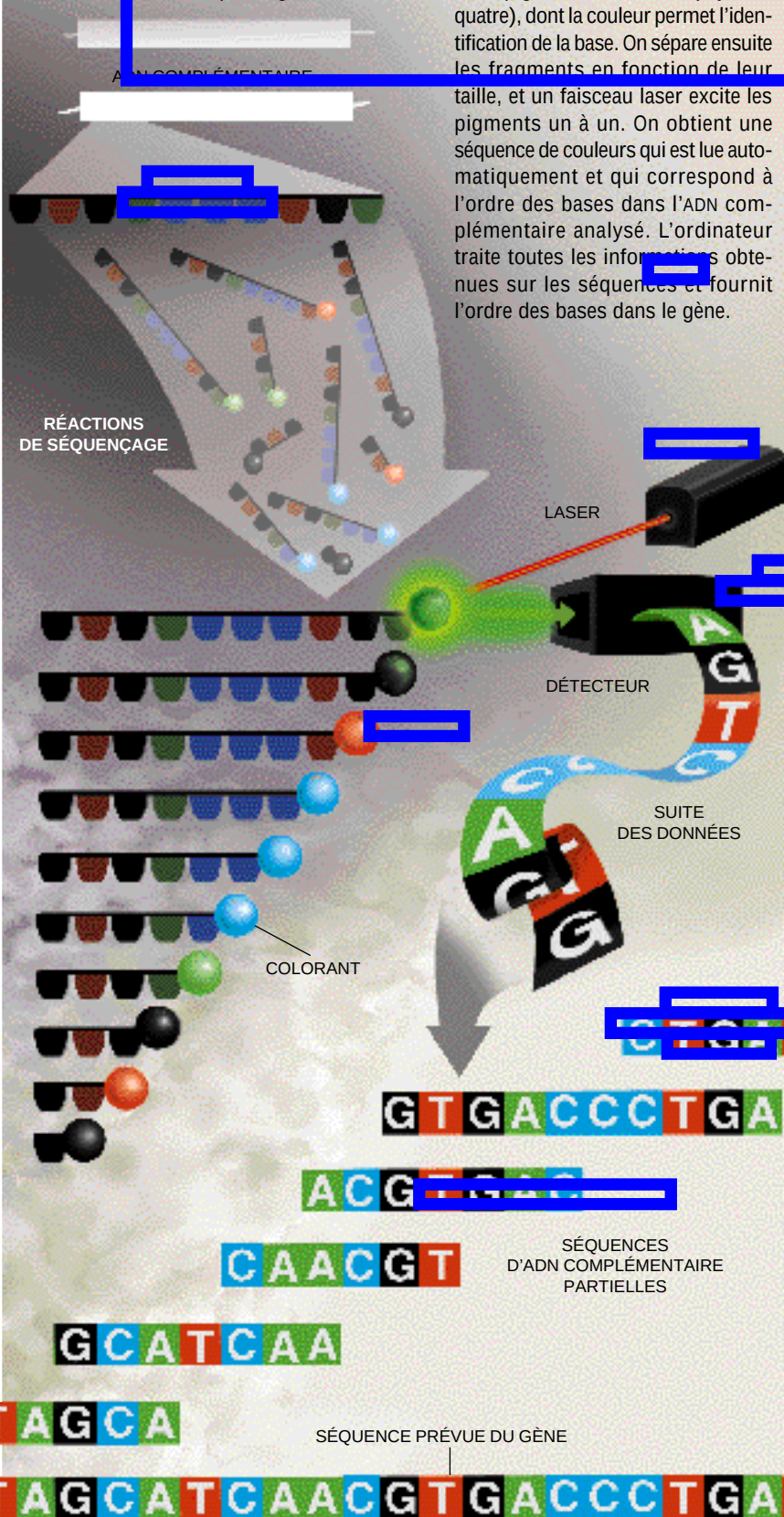
Les chercheurs de la Société HGS ont préparé des banques d'ADN complémentaires humains pour presque tous les organes et tous les tissus sains, ainsi que pour de nombreux organes et tissus pathologiques.



Comment trouver une séquence partielle d'ADN complémentaire?

Pour obtenir des séquences d'ADN complémentaires, les biologistes «découpent» des copies d'une molécule d'ADN complémentaire, fabriquant ainsi toute une gamme de fragments dont les longueurs diffèrent seulement d'une base. La base située à une extrémité de chaque fragment est associée à un pigment fluorescent (il y en a

quatre), dont la couleur permet l'identification de la base. On sépare ensuite les fragments en fonction de leur taille, et un faisceau laser excite les pigments un à un. On obtient une séquence de couleurs qui est lue automatiquement et qui correspond à l'ordre des bases dans l'ADN complémentaire analysé. L'ordinateur traite toutes les informations obtenues sur les séquences et fournit l'ordre des bases dans le gène.



En 1992, nous avons créé la société HGS et commencé à collaborer avec l'Institut pour la recherche génomique, dirigé par Craig Venter; six mois plus tard, le Laboratoire pharmaceutique Smith Kline Beecham nous rejoignait. Puis d'autres laboratoires se joignent à nous : Schering-Plough, Merck, Syntelabo et Takeda.

La fabrication de gènes

Pourquoi s'intéresse-t-on aux gènes, puisque les médicaments sont constitués de protéines et non de gènes? En théorie, on pourrait analyser directement les protéines cellulaires. Toutefois, on ne sait pas les fabriquer, même quand on en connaît la composition; or, pour produire des médicaments, il faudrait synthétiser des quantités notables de protéines identiques. On atteint cet objectif en isolant les gènes intéressants et en les transplantant dans des cellules qui les expriment.

Notre méthode d'identification des gènes est fondée sur l'analyse d'un produit intermédiaire, formé lorsque les gènes s'expriment : l'ARN messager. Les enzymes qui synthétisent les ARN messagers copient les gènes : le message codé est identique sur le brin d'ADN codé et sur la molécule d'ARN synthétisée. L'ARN messager sert ensuite de modèle pour la synthèse de la protéine spécifique codée par le gène. Les ARN messagers nous sont utiles, parce qu'ils sont synthétisés uniquement lorsque les gènes correspondants sont actifs. La séquence de l'ARN, copie de la séquence du gène, donne suffisamment d'informations pour que l'on isole le gène de l'ADN cellulaire et pour que l'on fabrique la protéine correspondante.

Comme l'ARN messager est très fragile, nous avons plutôt manipulé des ADN complémentaires, c'est-à-dire des molécules d'ADN qui sont des copies stables de l'ARN messagers. Pour synthétiser des molécules d'ADN complémentaires, nous mélangeons les molécules d'ARN messager avec des nucléotides (les sous-unités de l'ADN) et une enzyme, la transcriptase inverse, qui lit les sous-unités de l'ARN messager et les convertit en sous-unités d'ADN. L'enzyme construit le «collier» de l'ADN complémentaire en transcrivant les «perles» ARN en «perles» ADN.

Les ADN complémentaires ainsi obtenus sont généralement des répliques de segments d'ARN messa-

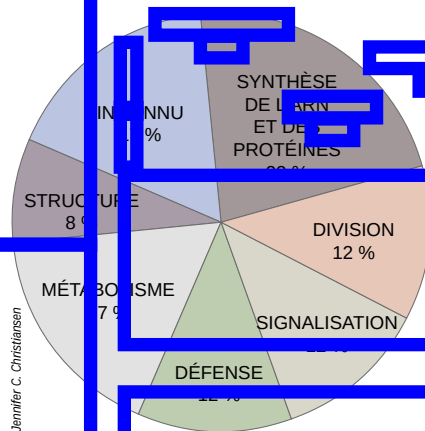
ger et non des molécules entières, longues parfois de plusieurs milliers de bases. Différentes parties d'un même gène donnent des ADN complémentaires dont l'origine commune n'est pas toujours évidente, mais un ADN complémentaire, même s'il n'est composé que de quelques milliers de bases, conserve des traces de son origine : la probabilité que deux gènes différents aient en commun la même séquence de plusieurs milliers de bases est très faible ; une molécule d'ADN complémentaire identifie spécifiquement un gène, tout comme un chapitre d'un livre ne laisse pas de doutes sur sa provenance.

Une fois que nous avons obtenu une molécule d'ADN complémentaire, nous savons en fabriquer des copies à volonté, de sorte que nous pouvons déterminer l'ordre des bases. Cet ordre des bases révèle la séquence des acides aminés dans la partie de la protéine qui serait codée par l'ARN messager. Quand nous comparons ensuite cette séquence à celles de protéines déjà connues, nous découvrons parfois la fonction de la protéine complète, car des protéines dont les fonctions sont voisines ont souvent des séquences d'acides aminés qui se ressemblent.

L'analyse des séquences des ADN complémentaires était très longue, mais elle a récemment été automatisée. À l'aide d'ordinateurs puissants et de programmes spécialisés, nous traitons les considérables quantités de données produites.

L'assemblage du puzzle

Pour identifier les gènes activés dans une cellule, nous analysons une séquence de 300 à 500 bases à l'une des extrémités de chaque molécule d'ADN complémentaire ; ces séquences servent de marqueurs des gènes. Nous avons choisi ce nombre de bases pour que la séquence soit analysée suffisamment rapidement et que le gène soit identifié sans ambiguïté. Si l'on compare une molécule d'ADN complémentaire à un chapitre d'un livre, une séquence de 300 à 500 bases est comparable à la première page du chapitre : elle permet d'identifier le livre et donne même une idée de son contenu. De même, une séquence d'ADN complémentaire nous renseigne sur le gène dont elle provient. Nous élucidons ainsi, chaque jour, une longueur totale d'ADN complémentaire qui atteint un million de bases.



1. LA PROPORTION DES GÈNES participant aux principales activités cellulaires a été déduite de l'étude de 150 000 séquences partielles. D'après les ressemblances entre les gènes humains et d'autres gènes dont on connaissait le rôle, on a attribué une fonction probable aux séquences nouvelles.

Les séquences produites sont pour la plupart issues de l'un des 6 000 gènes déjà identifiés par diverses méthodes. Quand nous ne pouvons pas associer une nouvelle séquence d'ADN complémentaire à un gène connu, nous consultons d'autres bases de données afin de chercher si cette nouvelle séquence s'identifie à une séquence déjà répertoriée. Quand deux séquences ont un long segment commun, nous construisons des segments plus longs, par réunion des deux. Nous supposons alors que ces séquences incomplètes existent quelque part dans le gène d'origine. Ce procédé s'apparente à celui qui consiste à rassembler des morceaux de phrase tels que «L'éciale ayant chanté tout l'été», «tout l'été je trouva fort dépourvue» et «fort dépourvue quand la bise fut venue» et à les combiner pour retrouver la fable de La Fontaine.

Simultanément, nous tentons de prévoir la fonction probable des protéines en fonction de leur séquence. Ayant calculé la structure possible, nous la comparons avec celle d'autres protéines connues. Nous trouvons parfois une ressemblance avec une protéine humaine, mais, souvent, c'est avec une protéine de bactérie, de champignon, de plante ou d'insecte : beaucoup d'organismes produisent des protéines proches des protéines humaines. Nos ordinateurs réactualisent constamment ces classifications provisoires.

Notre banque de données contient aujourd'hui plus d'un million de petites séquences de gènes, assemblées en 170 000 séquences plus longues. Ces séquences couvrent sans doute la tota-

lité des gènes humains qui s'expriment : lorsque des biologistes trouvent un nouveau gène nous avons déjà, dans plus de 95 pour cent des cas, une séquence correspondant à ce gène dans notre banque. L'assemblage de plusieurs petites séquences donne souvent la séquence totale des gènes découverts. Enfin, plus de la moitié des gènes que nous avons identifiés ressemblent à des gènes dont la séquence est établie et dont on connaît la fonction. Cette proportion s'accroît régulièrement.

Quand un même gène produit un nombre anormalement élevé de séquences d'ADN complémentaires, c'est qu'il synthétise beaucoup d'ARN messager et une quantité élevée de la protéine correspondante : on en déduit que cette protéine joue un rôle important. De surcroît, les gènes qui s'expriment uniquement dans quelques tissus très limités risquent d'être impliqués dans les maladies de ces tissus. Ainsi, 300 gènes sont susceptibles d'avoir un intérêt médical parmi les milliers de gènes que nous avons découverts.

Nouveaux gènes, nouveaux médicaments

En utilisant la méthode des séquences d'ADN complémentaires pour découvrir de nouveaux gènes, nous avons dénombré les gènes qui participent aux principales fonctions cellulaires, par exemple aux fonctions de défense ou au métabolisme. L'abondance des informations fournies par les séquences d'ADN complémentaires ouvre de nouvelles voies de recherche en pharmacologie. Avec le Laboratoire *SmithKline Beecham* et d'autres laboratoires publics ou privés, nous explorons diverses possibilités.

Ainsi, on détecte le cancer de la prostate en mesurant les concentrations sanguines d'une protéine nommée l'antigène spécifique de la prostate (chez les personnes malades, cette concentration est anormalement élevée). Malheureusement ce dosage est ambigu, car des tumeurs assez bénignes et qui progressent très lentement entraînent parfois une augmentation de la concentration en antigène aussi forte que des tumeurs malignes qui nécessitent un traitement d'urgence.

Nous avons analysé des ARN messagers provenant de plusieurs échantillons de tissus prostatiques sains, ainsi que de tumeurs prostatiques bénignes ou malignes. Nous avons trouvé envi-

ron 300 gènes uniquement exprimés dans la prostate ; parmi ces gènes, 100 environ ne sont actifs que dans les tumeurs prostatiques et 20 dans les tumeurs qualifiées de malignes par les spécialistes. Avec ces 20 gènes et les protéines qu'ils produisent, nous cherchons à élaborer des tests qui permettront de détecter spécifiquement les

tumeurs malignes de la prostate. Des recherches identiques sont en cours pour les cancers du sein, du poumon, du foie et du cerveau.

Les séquences d'ADN complémentaires servent aussi à la découverte de petites molécules potentiellement thérapeutiques. Les méthodes que les chimistes utilisent pour découvrir ces

ter de petites molécules ont notablement progressé au cours des dernières années. Des robots testent rapidement les effets de composés naturels et synthétiques sur des protéines humaines associées à diverses maladies. Jusqu'à présent, on manquait de protéines cibles, mais notre méthode en produit beaucoup, qui sont systématiquement tes-

Quatre décennies de progrès

Les avancées actuelles de la génétique reposent sur quatre décennies de progrès continus dans la connaissance de la mécanique génétique qui règle le fonctionnement des cellules.

Au début des années 1960, les pionniers de la biologie moléculaire, les Britanniques Sydney Brenner et Francis Crick, l'Américain James Watson et les Français François Gros, François Jacob et Jacques Monod conçoivent et mettent en évidence, d'abord chez les bactéries, l'existence d'un intermédiaire dans le fonctionnement des gènes, l'ARN messager. À la fin de la décennie, les Américains Howard Temin et David Baltimore montrent que la transcriptase inverse des rétrovirus est une enzyme capable de recopier l'ARN messager des rétrovirus en ADN complémentaire. C'est en 1975 que les Français François Rougeon et Philippe Kourilsky, et le Suisse Bernard Mach, réalisent le premier clonage dans une bactérie d'un ADN complémentaire copie de l'ARN messager contrôlant la synthèse d'une molécule d'hémoglobine. À partir de 1977, les méthodes de séquençage de l'ADN décrites par l'Américain Walter Gilbert et le Britannique Frederick Sanger donnent accès à la structure des gènes et permettent d'en déduire la conformation primaire des protéines qu'ils codent. La capacité de programmer la synthèse de protéines humaines dans des micro-organismes ouvre la voie à l'essor du génie génétique et à la production de nouveaux médicaments.

Au milieu des années 1980, un grand programme international a été conçu, visant à l'analyse complète du génome humain. L'objectif de la première phase du Projet génome humain, démarrée en 1990, a été d'établir des cartes qui permettent de localiser rapidement les régions chromosomiques contenant des gènes impliqués dans telle ou telle fonction biologique ou dans des pathologies. Le Centre d'études du polymorphisme humain (CEPH) a été fondé en 1983 par Jean Dausset. Les familles sélectionnées qui ont accepté de participer à la collecte d'ADN ont joué un rôle central dans ce travail de cartographie. Les équipes françaises de Daniel Cohen et de Jean Weissenbach (au CEPH et au Généthron), soutenues par l'Association française de lutte contre les myopathies, l'AFM, et par les donateurs du Téléthon ont apporté une contribution notable.

La seconde phase du Projet génome humain visant à déterminer la séquence complète des trois milliards de nucléotides dans les 23 paires de chromosomes est en cours d'organisation. Aujourd'hui, moins de deux pour

cent de l'ensemble a été déchiffré, et il faudra encore de longues années pour achever le déchiffrement.

Afin d'accéder plus rapidement à la connaissance de la structure fine des gènes, de leur position précise sur les chromosomes, mais aussi de leur lieu de fonctionnement dans l'organisme, plusieurs équipes à travers le monde ont entrepris à partir de 1990 le séquençage systématique de collections de clones d'ADN complémentaires. Cette initiative a été le fait de chercheurs du milieu académique, tels Sydney Brenner et moi-même en Europe, Kenichi Matsubara au Japon, James Sikela et Craig Venter aux États-Unis. Ce dernier a poursuivi son travail au sein d'un institut privé, *TIGR*, financé par la Société *HGS* de William Haseltine et le Laboratoire pharmaceutique *SmithKline Beecham*. Une autre société américaine *Incyte Pharmaceuticals*, a également développé une importante base de données de séquences d'ADN complémentaires qu'elle met à la disposition de ses clients de l'industrie pharmaceutique.

Poursuivant l'effort que j'ai entrepris en France en 1990 avec le programme Genexpress (il s'agit d'une collaboration entre le CNRS et l'AFM réalisée avec le concours du Laboratoire Généthron et le soutien de l'Union européenne), j'ai fondé en 1993 avec mes collègues Bento Soares, de l'Université Columbia à New York, Greg Lennon, à Liverpool, et Mihael Polymeropoulos, à Bethesda, le Consortium international IMAGE. Nous cherchons à collecter le maximum de données biologiques et génétiques pertinentes en favorisant l'étude des mêmes collections de clones d'ADN complémentaires de référence, et la diffusion des résultats dans les bases de données publiques internationales. Ainsi, nos efforts conjugués avec ceux de nombreux laboratoires européens, japonais et américains, notamment le centre génome de l'Université de Washington à Saint Louis, financé par la Société *Merck*, permettent aux chercheurs du monde entier d'avoir accès à des connaissances – au moins partielles – sur la majorité des transcrits des gènes humains. Une collaboration équilibrée entre les pouvoirs publics, les fondations, les associations qui soutiennent la recherche en génétique et les industriels est indispensable pour que l'on puisse déterminer dans un proche avenir la séquence complète de tous les transcrits du génome humain, comprendre la fonction des protéines qu'ils codent, et utiliser ces nouvelles connaissances pour le diagnostic, la prévention et le traitement des maladies.

Charles AUFFRAY, CNRS-UPR 420, Villejuif

tées. Enfin, les banques d'ADN complémentaires permettent la conception «sur mesure» des molécules qui interagissent spécifiquement avec des protéines dont on a elucidé la structure.

Un exemple d'application de nos données est celui des ostéoclastes, des cellules de l'os produisant une enzyme qui dégrade le tissu osseux. Dans quelques maladies, telles l'ostéoarthritis et l'ostéoporose, cette enzyme semble produite en excès. Dans notre banque de données, nous avons trouvé une séquence d'un gène exprimé dans les ostéoclastes et qui semblait coder l'enzyme destructrice ; sa séquence était analogue à celle d'un gène codant une enzyme qui dégrade le cartilage. Nous avons établi que le gène des ostéoclastes code bien l'enzyme de dégradation et qu'il ne s'exprime pas dans les autres tissus : si nous trouvons une molécule qui inhibe cette enzyme, elle n'agira que dans le tissu cible, sans endommager les autres tissus. Nous avons synthétisé cette enzyme, et le Laboratoire *Smith-Kline Beecham* en a recherché des inhibiteurs. Des molécules destinées à lutter contre l'athérosclérose sont également en cours d'étude.

Les récepteurs couplés aux protéines G sont une autre classe intéressante de protéines. Ces protéines se lient à diverses molécules qui servent de signaux, et leur activation se répercute sur des protéines G, qui traversent les membranes cellulaires et transmettent les signaux biologiques de l'extérieur des cellules vers l'intérieur. Les récepteurs participent à des maladies aussi variées que l'hypertension, les ulcères, la migraine, l'asthme, le rhume ou les troubles psychiatriques : en bloquant leur action, on soulagerait ces symptômes. Nous avons découvert plus de 70 nouveaux récepteurs couplés aux protéines G. Nous cherchons leur fonction en introduisant les gènes de ces récepteurs dans des cellules et en évaluant les réactions des cellules qui les synthétisent quand elles sont soumises à divers stimulus. Les protéines codées par deux de ces gènes semblent intervenir dans l'hypertension et dans le diabète de l'adulte. Des laboratoires pharmaceutiques recherchent des molécules qui bloqueraient les signaux normalement transmis par ces récepteurs.

Enfin, nous pensons qu'un certain nombre de gènes et de protéines humaines que l'on découvre aujourd'hui seront des traitements pour demain. Plusieurs protéines humaines

Protéine	Activité	Utilisation potentielle
Facteur de croissance des kératinocytes	Stimule le renouvellement de la peau	Cicatrisation, stimulation de la croissance des cheveux, protection contre les effets secondaires de la chimiothérapie.
Protéine inhibitrice du pré-curseur myéloïde	Empêche la destruction des cellules de la moelle osseuse par la chimiothérapie	Protection contre les effets secondaires de la chimiothérapie.
Facteur de croissance des neurones moteurs	Évite la mort des neurones moteurs à la suite d'un traumatisme	Traitement des lésions nerveuses d'origine traumatique, des accidents vasculaires cérébraux et de l'atrophie musculaire liée au vieillissement.
Facteur inhibiteur des monocytes	Inhibe les macrophages	Traitement de la polyarthrite rhumatoïde et d'autres maladies auto-immunes, associées aux macrophages.

2. CES PROTÉINES HUMAINES, synthétisées après la découverte des gènes qui les codent par la méthode de l'ADN complémentaire, ont des propriétés intéressantes *in vitro* ou même chez l'animal. Elles sont en cours d'évaluation pour leurs propriétés thérapeutiques potentielles.

sont déjà des médicaments : l'insuline, pour les diabétiques, le facteur de coagulation, pour les hémophiles, ou des protéines qui accélèrent le rétablissement pour les patients ayant subi une chimiothérapie (ces protéines stimulent la production des cellules sanguines).

Environ 200 des séquences géniques que nous avons découvertes correspondent à des protéines qui devraient avoir des applications thérapeutiques. Nous avons synthétisé la plupart de ces protéines et testé leur activité sur des cellules. C'est notamment le cas de nombreuses chimokines qui stimulent les cellules immunitaires.

La mise au point de médicaments ne sera jamais rapide : qu'il s'agisse de pro-

téines, de gènes ou de petites molécules, tout doit être minutieusement testé. Toutefois, cette méthode peut accélérer la découverte de nouveaux traitements.

L'utilisation des méthodes automatisées et informatiques pour la recherche des gènes a, pour la première fois, permis de dresser un tableau complet des sites d'expression des différents gènes, une carte de l'expression des gènes humains. De plus, nous commençons à découvrir comment l'expression des gènes change au cours des maladies. On ignore encore à quel moment le premier médicament issu de nos recherches sera sur le marché, mais tous ceux qui suivront devraient être au cœur de la médecine du XXI^e siècle.

William H. ASELTINE est le président directeur général de la Société HGS (*Human Genome Science*), à Rockville.

Paul BERG et Maxine SINGER, *Dealing with Genes: The Language of Heredity*, University Science Books, Blackwell Scientific Publications, 1992.

N. PAPADOPOULOS, *Mutation of a MUTL Homolog in Hereditary Colon Cancer*, in *Science*, vol. 263, pp. 1625-1629, 18 mars 1994.

N. NICOLAIDES et al., *Mutations of Two PMS Homologues in Hereditary Nonpolyposis Colon Cancer*, in *Nature*, vol. 317, pp. 75-80, 1^{er} septembre 1994.

Mark L. ADAMS et al., *Initial Assessment of Human Gene Diversity and Expression Patterns Based upon 83 Million Nucleotides of cDNA Sequence*, in *Nature*, vol. 371, supplément, pp. 3-174, 28 septembre 1995.

Yamori A. et al., *ACDAR Encoding the Calcitonin Gene-Related Peptide Type 1 Receptor*, in *Journal of Biological Chemistry*, vol. 271, n° 19, pp. 11325-11329, 10 mai 1996.

Fred H. DRAKE et al., *Cathepsin K, but Not Cathepsins B, L or S, Is Abundantly Expressed in Human Osteoclasts*, in *Journal of Biological Chemistry*, vol. 271, n° 21, pp. 12511-12516, 24 mai 1996.

La chimie des formes

PATRICK DE KEPPER • ÉTIENNE DE DULOS

Des réactions chimiques engendrent des figures évoquant les rayures du zèbre et les taches du léopard. Ces similarités sont-elles fortuites ?

Depuis le prodigieux Big Bang d'où émergea l'Univers jusqu'aux mécanismes du développement embryonnaire, les processus qui gouvernent l'apparition spontanée des formes sont objets de recherches très actives.

L'information qui orchestre le développement des êtres vivants est-elle directement inscrite dans les chromosomes ? C'est peu probable. La quantité d'information nécessaire à la construction d'un être vivant dépasse de beaucoup celle contenue dans le

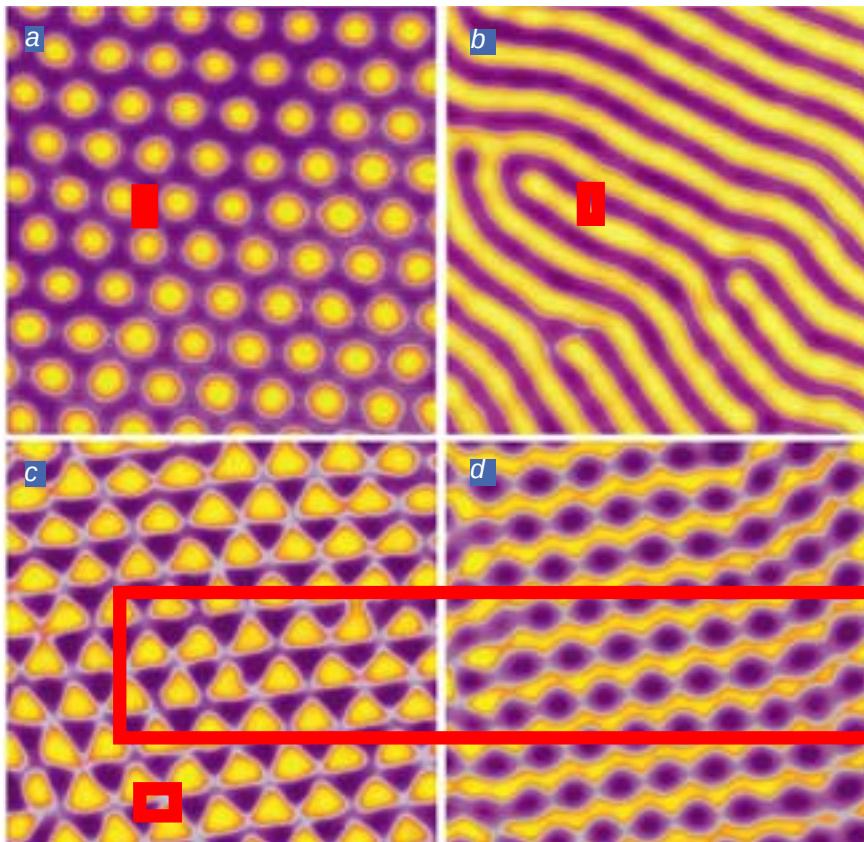
génom. Nombre d'approches contemporaines de la biologie du développement posent pour principe que morphogenèse et différenciation cellulaire résultent de deux types de processus : les processus génétiques et des processus physiques, qualifiés de « génériques ». Nous allons examiner dans cet article comment les processus génériques produisent des motifs semblables à ceux qui décorent le pelage de certains mammifères.

Tandis que les processus génétiques président à la synthèse des élé-

ments constitutifs d'un organisme, les processus génériques interviennent à différents stades du développement embryonnaire pour gouverner la différenciation cellulaire et le développement des formes. Dès 1952, le mathématicien anglais Alan Turing publie un article intitulé *Les bases chimiques de la morphogenèse* où il démontre l'effet possible de certains processus génériques. Il imagine un mécanisme ingénieux où la réaction entre des molécules biochimiques (des « morphogènes »), qui diffusent dans un tissu, engendre spontanément des structurations. Turing démontre que, partant d'un milieu homogène, on peut aboutir à une répartition périodique dans l'espace de la concentration de ces morphogènes. Dans le modèle de Turing, une instabilité résultant des propriétés intrinsèques du système réactionnel brise la symétrie initiale du milieu, engendrant spontanément sa structuration, son « auto-organisation ». A l'époque, cette idée ne suscita que peu d'intérêt, en partie parce que la chimie peu orthodoxe du modèle de Turing conduisait parfois à des concentrations négatives de certaines substances... hérésie qui rendit peu crédible cette étrange prédiction !

Théorie, simulation et motifs naturels

Dans les années 1960, P. Glansdorf et I. Prigogine élaborent le cadre conceptuel justifiant, sur le plan thermodynamique, l'approche de Turing. I. Prigogine et ses collaborateurs de l'École de thermodynamique de Bruxelles démontrent que de tels phénomènes d'auto-organisation sont possibles lorsque le système évolue loin de son état d'équilibre thermodynamique. Ils proposent même un modèle chimique très simple, affranchi des travers du



1. STRUCTURES CHIMIQUES vues par transparence dans des réacteurs à disque de gel. Les motifs sont présentés en fausses couleurs pour mettre en évidence leurs éléments géométriques (le bleu violacé et le jaune orangé correspondent respectivement aux fortes et aux faibles concentrations en iode). Motifs bidimensionnels standards : a) réseau hexagonal de taches, b) bandes parallèles. Motifs exotiques à caractère tridimensionnels : c) réseau triangulaire, d) bandes « variqueuses ».

modèle de Turing. Il est ainsi clairement démontré que, pour donner lieu à des structururations, le système doit mettre en jeu des processus réactionnels non linéaires (c'est-à-dire où les effets ne sont pas proportionnels aux causes) et que le maintien des structures nécessite un échange permanent de réactifs entre le système et le milieu extérieur.

Ainsi les phénomènes d'auto-organisation nécessitent :

- des mécanismes d'auto-activation (en chimie, les plus simples sont des autocatalyses). Un (auto-)activateur est le promoteur de sa propre production, tel le feu qui consume une botte de paille : l'embrasement s'étend d'autant plus vite que s'accroît la quantité de chaleur produite par le développement des flammes.

- Des mécanismes d'inhibition qui s'opposent à la production d'activateur.

– En fait, la diffusion ! C'est paradoxal, car l'expérience quotidienne nous enseigne plutôt que la diffusion estompe toute hétérogénéité de concentration. En effet, une goutte d'encre déposée dans un verre d'eau se dilue progressivement : comme les atomes d'un gaz, les molécules d'encre tendent à occuper tout le volume qui leur est offert.

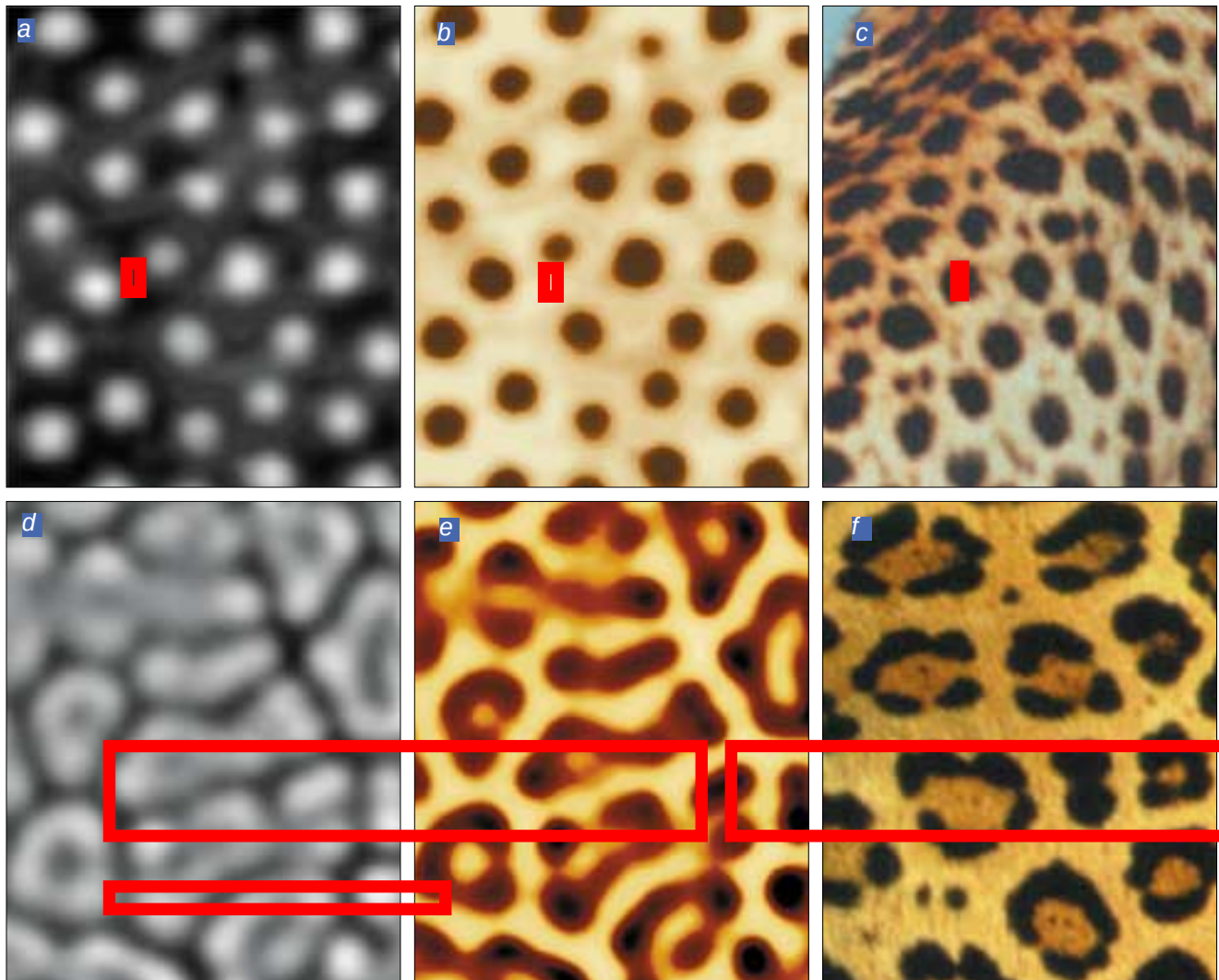
– En outre, le maintien de l'auto-organisation exige l'alimentation permanente du système en réactifs.

Le secret des structures proposées par Turing réside dans la cinétique non linéaire de la réaction associée à des différences de vitesses de diffusion des espèces chimiques mises en œuvre. Plus précisément, l'inhibiteur doit diffuser plus vite que l'activateur. Ces conditions, difficiles à réunir dans les milieux chimiques classiques, sont fréquentes dans les sys-

tèmes biologiques où processus d'auto-activation et d'inhibition sont de règle, et où certaines molécules diffusent plus difficilement que d'autres du fait de leur taille ou de leur forte interaction avec le milieu.

En s'appuyant sur des propriétés reconnues de nombreux mécanismes biochimiques, les biophysiciens allemands A. Gierer et H. Meinhardt construisent en 1972 un modèle « activateur-inhibiteur ». Ils admettent que l'espèce auto-catalytique (l'activateur) engendre son propre inhibiteur et que celui-ci diffuse beaucoup plus vite que l'activateur. À partir de là, ils expliquent de la façon suivante la formation d'une structure de Turing (voir la figure 3).

Supposons que, dans le milieu initialement homogène, une fluctuation naturelle produise en un point un léger excès d'activateur. Cela entraîne



2. L'ÉTONNANTE RESSEMBLANCE entre les structures chimiques et les motifs décorant le pelage de certains mammifères. Afin de souligner cette similarité, l'échelle de gris des images issues de la chimie (a et d) est traduite en palette de couleurs (b et e). Des gros

plans des motifs du dos d'un guépard (c) et d'un léopard (f) sont présentés pour comparaison. Les images a et d sont obtenues avec la même réaction chimique, mais pour deux concentrations différentes des solutions de réactifs.

bientôt une très forte élévation locale de la concentration d'activateur, qui ne diffuse que lentement dans le voisinage. L'inhibiteur qui est produit simultanément diffuse beaucoup plus vite et s'étend rapidement dans un plus vaste domaine autour de cette zone : l'inhibiteur empêche ainsi la propagation de l'activateur. Il se forme donc un pic localisé d'activateur. De tels pics tendent à émerger un peu partout, à écartement distribué. De leur compétition naissent, dans un système plan, des organisations régulières en réseaux hexagonaux de taches ou en bandes parallèles régulièrement espacées.

Les structures stationnaires obtenues résultent d'un bilan équilibré (d'un «équilibre dynamique») entre vitesse de transformation chimique et vitesse de diffusion des réactifs. Ce ne sont pas, comme les cristaux, des structures d'équilibre. Quand on cesse de fournir des réactifs, la réaction s'épuise, le caractère homogénéisant de la diffusion reprend ses droits et les structures s'effacent. Comme les êtres vivants, les structures de Turing meurent quand on cesse de les alimenter. Ces structures sont dites «dissipatives» car leur existence est liée à la consommation (dissipation) de matière ou d'énergie.

Depuis les travaux de I. Prigogine, elles ont été étudiées théoriquement, notamment par des biologistes théoriciens et des biomathématiciens qui les utilisent pour expliquer différents aspects de la morphogenèse. Ainsi, J. Murray s'est efforcé de rendre compte de la diversité des motifs sur le pelage des mammifères : rayures du zèbre, taches du léopard ou du tigre.

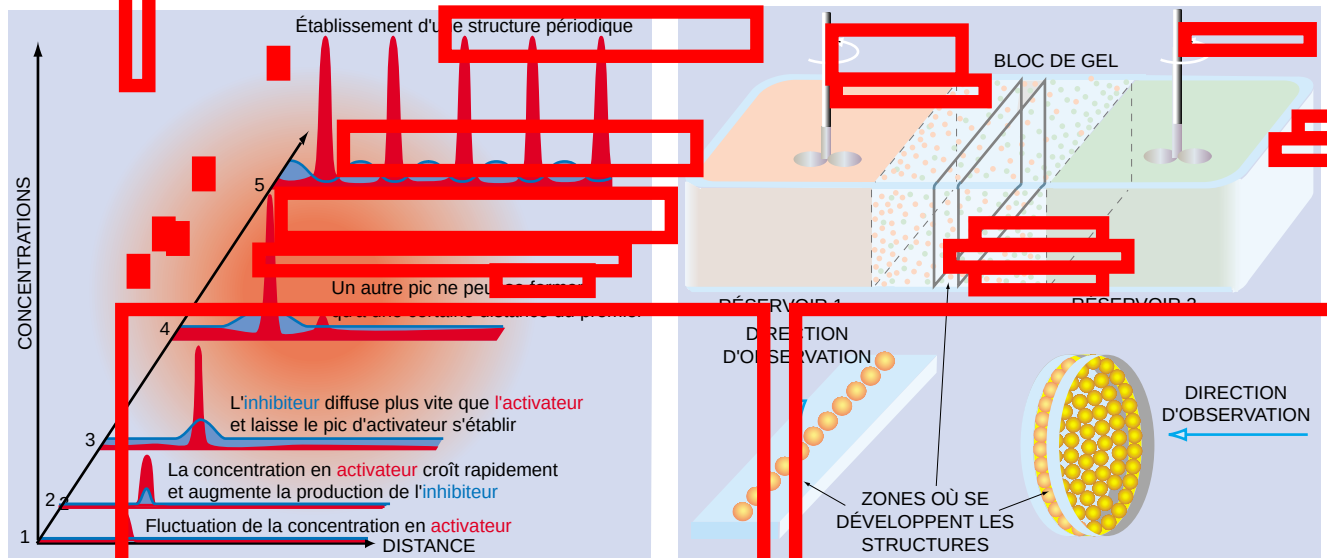
Pour J. Murray, l'organisation en taches ou en bandes est liée à une distribution spatiale de la concentration d'un morphogène. Cette distribution constituerait un «prémotif» et résulterait d'une instabilité de réaction-diffusion de type Turing. Ce prémotif, formé très tôt au cours du développement embryonnaire, serait «lu» à un stade ultérieur et figé. Le motif final sur le pelage des mammifères refléterait ce prémotif : la forte ou la faible concentration de morphogène, suivant la position considérée dans le prémotif, induirait ou non la différenciation des mélanocytes (cellules sécrétrices du pigment, la mélanine). Or, l'idée d'une organisation guidée par l'information reçue par chaque cellule est fondamentale en biologie du développement : selon L. Wolpert, le devenir d'une cellule au cours du développement peut être

détourné d'un type cellulaire vers un autre type, suivant la concentration locale ambiante des morphogènes.

Ainsi les structures stationnaires de Turing pourraient expliquer certains aspects de la morphogenèse, pourvu que l'on accepte l'idée de morphogènes. Les biologistes ont identifié des substances morphogénétiques dans certains tissus en développement.

Des réactions oscillantes aux structures de Turing

Pourquoi fallait-il attendre si longtemps pour observer de telles structures alors que tant d'équipes, depuis les années 1970, rêvaient de les découvrir ? Le premier obstacle à leur réalisation était de disposer de réactions chimiques adéquates. Il s'agit de réactions chimiques oscillantes. Ce n'est qu'en 1963, au Congrès de Prague, après de longues années de contestations, que cette aptitude de certaines réactions chimiques à osciller a été reconnue par la communauté scientifique. À Prague, des chimistes et des biochimistes apportaient la preuve que les oscillations de ces systèmes (phénomènes à l'évolution périodique au cours du temps) étaient reproductibles



3. NAISSANCE D'UNE STRUCTURE DE TURING. Dans un système activateur (bleu)-inhibiteur (rouge) homogène se développent des hétérogénéités de concentration. (1) Sous l'effet de fluctuations du milieu un léger excès d'activateur se forme localement. (2) La concentration locale en activateur croît, entraînant la production locale d'inhibiteur. (3) L'inhibiteur diffuse plus rapidement que l'activateur, empêchant la concentration d'activateur de s'élever autour du pic d'activateur, qui est ainsi circonscrit. La concentration en activateur diminue même autour du pic. (4) D'autres pics d'activateur émergent, mais à distance du premier. (5) Il en résulte une structure stationnaire périodique.

4. LE REACTEUR SPATIAL est constitué d'un bloc d'hydrogel dont deux faces opposées sont en contact avec les solutions de réactifs contenues dans les réservoirs. L'oxydant est en 1, et le réducteur en 2. À partir de ces faces opposées, les réactifs diffusent dans le gel, se rencontrent et réagissent. Les structures de Turing se développent dans une strate entre les faces d'alimentation du gel. Des réacteurs de deux géométries ont été utilisés : ils diffèrent par le rapport de leurs dimensions et par la direction d'observation. Dans le réacteur à bande de gel représenté ici, on regarde entre les faces d'alimentation. Dans un autre type de réacteur à disque de gel, l'observation se fait à travers les faces d'alimentation.

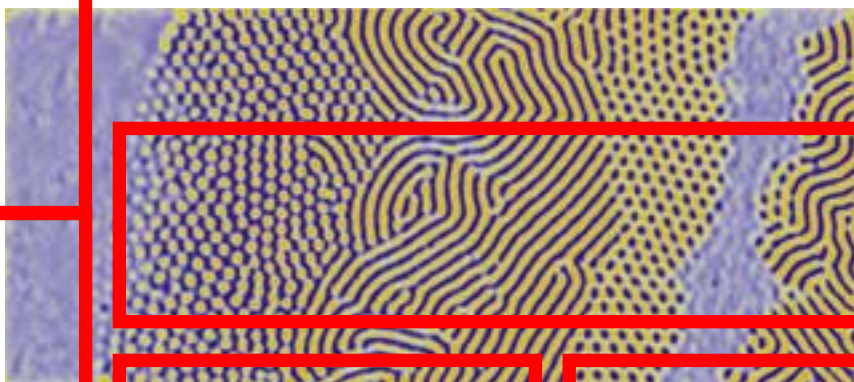
et contrôlables... et non des artefacts. Ces oscillations s'interprètent dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles chère à l'école de Bruxelles.

Il n'existe pas de condition suffisante pour produire des systèmes chimiques oscillants : tous ceux que l'on connaissait avant 1980 étaient, soit le fruit du hasard, soit le résultat de modifications de réactions oscillantes déjà connues (par substitution d'un substrat ou d'un catalyseur par un autre), ou encore il s'agissait de systèmes biologiques oscillants tels que celui de la glycolyse.

À cette époque, notre équipe, en collaboration avec une équipe réunie autour de K. Kustin et I. Epstein, à l'Université de Brandeis, propose une méthode systématique pour découvrir des réactions oscillantes véritablement nouvelles. La méthode est fondée sur l'utilisation de réacteurs agités et continûment alimentés en réactifs – de véritables systèmes ouverts – et sur des aspects topologiques de diagrammes d'états associant phénomènes de bistabilité et d'oscillation. La méthode se révéla fructueuse : plus de 30 familles de nouveaux oscillateurs et dix fois plus de variantes (ce sont généralement des réactions d'oxydo-réduction) furent ainsi découvertes au cours des années 1980. Ainsi vit le jour la réaction «CIMA» qui permit, quelques années plus tard, de produire des structures de Turing.

Le problème de la diversité des réactions oscillantes étant résolu, notre équipe se lance alors, en collaboration avec l'équipe de Harry Swinney, au Texas, dans l'élaboration de réacteurs spatiaux ouverts. Mais, pour obtenir des structures de Turing, il restait à résoudre un autre problème délicat. Comment assurer un apport permanent en réactifs frais sans créer de mouvements convectifs ? Le seul processus de transport doit être, rappelons-le, la diffusion moléculaire des espèces. Des études théoriques conduites à la même époque à Bordeaux montrent qu'une structure de Turing peut se former dans des systèmes alimentés par diffusion des réactifs à partir des bords.

Alors s'ébauche naturellement le réacteur spatial ouvert : il est constitué d'un bloc d'hydrogel (polyacrylamide, agarose ou autre) dont deux faces opposées sont en contact avec



5. SÉQUENCE DE MOTIFS STATIONNAIRES déployée dans le plan et obtenue dans un réacteur à disque de gel dont l'épaisseur augmente de gauche à droite de la figure. L'épaisseur du système est ainsi le paramètre de contrôle des processus de sélection et de stabilité des structures. Le contraste des couleurs est rehaussé par traitement informatique. De gauche à droite, nous distinguons une succession de motifs correspondant aux états suivants du système : uniforme, réseau hexagonal centré de taches jaunes (minima de concentration d'activateur iodure), bandes parallèles, réseau hexagonal centré de taches bleues (maximum de concentration d'activateur), nouvel état uniforme, nouveau domaine de bandes.

les réactifs convenablement répartis dans deux réservoirs (voir la figure 4). Les solutions dans les réservoirs sont maintenues à concentration constante par renouvellement des réactifs à l'aide de pompes. À partir des faces d'alimentation, les réactifs diffusent dans le gel où ils se rencontrent et la réaction a lieu. L'hydrogel preserve le lieu de la réaction de tout mouvement convectif du fluide ; ainsi, la diffusion moléculaire reste le seul processus de transport des espèces. Pour des conditions appropriées de concentration et de température, une instabilité peut se développer, aboutissant à l'établissement de structures de Turing. Dans le premier réacteur spatial ouvert utilisé pour ces recherches, le morceau de gel est un ruban (bloc d'épaisseur faible). La réaction CIMA met en jeu des molécules de chlorite et d'iodure de sodium ainsi que de l'acide malonique, l'amidon servant d'indicateur coloré.

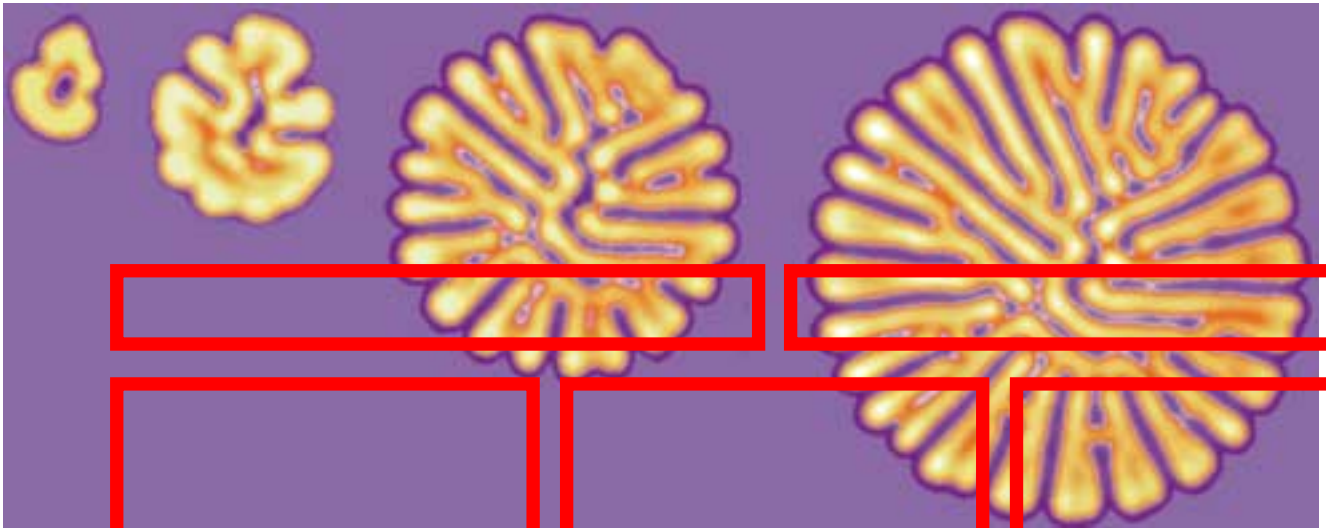
C'est en décembre 1989 que nous avons vu apparaître dans ce petit réacteur de minuscules taches claires et équidistantes se détachant sur un fond bleu sombre et formant des rangées parallèles aux bords du ruban. Aucune hétérogénéité macroscopique (précipité, destruction locale de la maille du gel) n'accompagne cette formation. La longueur d'onde du motif (quelques dixièmes de millimètre) est sans relation avec les dimensions géométriques du gel. La longueur d'onde est donc une caractéristique du milieu réactionnel. Ces motifs en taches constituent bien des structures de Turing !

Bientôt, l'équipe texane confirme cette découverte. Elle utilise un réacteur fondé sur les mêmes principes de fonctionnement, mais le bloc de gel est, dans ce cas, un disque alimenté par ses deux faces circulaires. À travers ces faces, on observe des plans recouverts, soit de taches arrangées en hexagone, soit de bandes parallèles. Ces motifs sont exactement ceux que prévoit la théorie. Actuellement, le réacteur disque est le plus couramment utilisé pour étudier les structures spatiales chimiques.

Un activateur ralenti !

Cependant, l'origine de la nécessaire différence de diffusivité entre activateur et inhibiteur est assez obscure au moment de la découverte. Les faibles différences de masse molaire entre espèces chlorées et iodées (qui participent respectivement aux processus d'inhibition et d'activation) pourraient-elles suffire à l'expliquer ? Des interactions spécifiques entre matrice polymérique du gel et certaines espèces chimiques interviendraient-elles ?

I. Lengyel et I. Epstein, à Brandeis, proposent, sur la base d'un mécanisme cinétique de la réaction, que l'indicateur colore ralentisse la diffusion de l'iodure (activateur) par rapport à celle du chlorite (inhibiteur). Des expériences réalisées à Bordeaux confirment immédiatement cette hypothèse : l'iodure, en présence de l'iode produite par la réaction, forme avec l'amidon, indicateur coloré utilisé au cours de ces expériences, un complexe



6. D'ÉTRANGES MOTIFS «FLORAUX» se déploient transitoirement lors du développement de la structure de Turing. Ces structures «transitoires» semblent résulter de l'interaction entre l'instabilité de Turing et d'autres instabilités morphologiques. Nous voyons ici différents stades du développement de ces motifs transitoires, pris à des intervalles de dix minutes.

bleu sombre, réversible. L'amidon, compte tenu de sa taille (c'est un polysaccharide de masse molaire de l'ordre du million de daltons), diffuse très lentement par rapport aux petits ions impliqués dans la réaction chimique. On peut même le considérer comme immobile. Ainsi, le complexe amidon-iodure immobilise à tout moment une partie de l'iodure en solution et la diffusion apparente de l'iodure total s'en trouve ralentie, alors que celle du chlorure n'est pas affectée. Pour mieux comprendre ce phénomène, comparons la diffusion des ions iodure aux mouvements d'une population de petites billes que l'on aurait déposées sur un plateau parsemé de petites alvéoles et agité en tous sens. Une partie des billes est immobilisée en passant dans les alvéoles. L'agitation les faisant ressortir au bout d'un certain temps, elles reprennent alors leur libre circulation. Ainsi, le mouvement de la population de billes est globalement ralenti par la rétention temporaire d'une fraction d'entre elles dans les alvéoles.

Une profusion de motifs

La différence de composition des solutions de réactifs dans les réservoirs de part et d'autre du bloc de gel engendre des gradients de concentration entre les deux faces d'alimentation du gel. Du caractère plus ou moins abrupt de ces gradients dépend la largeur de la région où se développe l'instabilité de Turing. On obtient ainsi des motifs très différents : simples

motifs bidimensionnels tels que les réseaux hexagonaux de taches ou les bandes parallèles décrits précédemment, mais aussi des motifs plus exotiques liés au caractère tridimensionnel des structures qui s'établissent parfois (voir la figure 1).

Tout comme pour les systèmes à l'équilibre, il est possible d'établir des diagrammes d'état des systèmes de non-équilibre en fonction des valeurs de divers paramètres (généralement, la concentration de divers réactifs dans les réservoirs). On détermine ainsi, pas à pas, toute une séquence d'états. Une telle séquence d'états peut être observée en une seule expérience, dans des disques de gel dont l'épaisseur varie continuellement (ce sont des disques aux faces non parallèles). Dans de tels cas, l'épaisseur du disque joue le rôle du paramètre de contrôle dont la valeur varie continuellement le long d'un diamètre du disque. Une séquence de motifs peut être ainsi analysée en une seule expérience (voir la figure 5).

Chimie et biologie : mêmes dessins

Comme nous l'évoquions au début de cet article, A. Turing proposait des processus de réaction-diffusion pour expliquer certains aspects de la morphogenèse des êtres vivants. En particulier, les motifs pigmentés décorant la peau de nombreux animaux pourraient résulter de tels processus.

Nous avons vu que des systèmes chimiques relativement simples peu-

vent spontanément produire des motifs variés. Toutefois, la ressemblance entre les motifs issus de la chimie et présentés plus haut et ceux que l'on observe dans la nature n'est souvent qu'assez lointaine ; l'organisation des motifs décorant les fourrures animales est bien plus irrégulière que la répartition périodique des motifs chimiques. D'après J. Murray, le pré-motif de morphogène est déposé très tôt au cours du développement embryonnaire et les expansions diverses subies ultérieurement par les différentes parties de l'embryon conduisent à des déformations plus ou moins sévères du motif initial. Cela explique en fait les différences qualitatives entre motifs chimiques et biologiques.

Par ailleurs, si nous considérons la naissance des motifs chimiques, il convient de remarquer que les structures, au moment où elles émergent de l'état uniforme, sont le plus souvent irrégulières. Ce n'est que très progressivement que s'opère leur réarrangement aboutissant aux structures périodiques présentées sur la figure 1. Elles correspondent à un système ayant atteint son état asymptotique. Il est probable que, chez l'embryon, le pré-motif de morphogène soit traduit en motif coloré avant que ne se soit écoulée cette période de réarrangement du motif (période qui, d'ailleurs, n'a peut-être aucun sens en biologie). Les motifs colorés sur les pelages des animaux ne seraient que l'image instantanée d'un «transitoire» (au sens mathématique de ce terme)

des processus qui leur ont donné naissance. Nous donnons, pour illustrer ce propos, deux instantanés de motifs chimiques tels qu'apparus au cours d'états transitoires du système et qui, à long terme, auraient abouti à une structure en réseau hexagonal de taches. Un traitement approprié de la palette de couleurs met en évidence d'étonnantes similarités entre ces motifs chimiques et ceux portés par les peaux du guépard et du léopard (voir la figure 2).

Dans des conditions un peu particulières (loin du seuil d'instabilité), diraient les spécialistes des systèmes non linéaires, bien d'autres motifs surprenants peuvent apparaître. Dans certains cas, les motifs s'étendent par division des premières taches apparues, évoquant curieusement la division cellulaire au cours de la croissance de tissus biologiques. Enfin notre équipe a récemment observé des croissances en forme de doigts, donnant naissance à d'étranges et transitoires «fleurs» chimiques (voir la figure 6).

Analoges et universalité

Aussi extraordinaires que soient les ressemblances entre structures chimiques de réaction-diffusion et certains motifs observés dans la nature, de telles similarités ne permettent nullement de conclure à l'identité des processus qui président à leur développement. De plus, étant donné l'extraordinaire complexité du réseau d'interactions propre à tout système biologique, isoler chez un être vivant des auto-activateurs et des inhibiteurs afin d'en vérifier le comportement *in vitro* tient souvent de la gageure.

Tout au plus, dans certains organismes où apparaissent des structures périodiques, on a réussi à identifier des morphogènes (par exemple le calcium au cours du développement des ramifications de l'algue *Acetabularia*) ou des molécules participant au processus d'auto-activation (au cours du développement du membre supérieur de l'embryon de poulet). Les expériences de biologie confirment aussi que, lors de la formation des motifs pigmentés sur la peau des mammifères, il y a bien développement de pré-motifs; toutefois l'origine de ceux-ci reste mal établie, et l'on sait que ce processus met aussi en

œuvre des migrations de cellules et l'adhésion entre cellules.

Quoi qu'il en soit des difficultés inhérentes au milieu biologique, les systèmes biologiques, aussi bien que les systèmes chimiques non linéaires, sont capables d'évoluer d'un état quasi indifférent vers un nouvel état plus structuré. Cette transition constitue ce que les physiciens appellent une «brisure de symétrie». Ces brisures de symétrie peuvent être décrites par les mêmes équations mathématiques, définissant ainsi des classes d'universalité. Certains systèmes biologiques, tout comme les systèmes chimiques de réaction-diffusion, appartiennent au moins en partie à la même classe d'universalité, et les connaissances que l'on acquiert sur les uns contribuent à élucider les comportements des autres. Si des biologistes de plus en plus nombreux pensent que les processus de réaction-diffusion jouent un rôle au cours de la morphogenèse, il est certain que, outre la réaction-diffusion, d'autres processus physiques contribuent à l'élaboration des formes lors des multiples modifications qui ont lieu au cours du développement embryonnaire. Ce domaine de recherches est en plein essor.

Sur *Archimède*, l'émission franco-allemande de vulgarisation scientifique d'ARTE, P. De KEPPEL présente «Les taches du léopard», le 13 mai 1997 à 20 heures.

P. De KEPPEL est directeur de recherche et É. DULOS est chargée de recherche au Centre de recherche Paul Pascal, laboratoire du CNRS à Bordeaux.

Oscillations and travelling waves in chemical systems, sous la direction R.J. Field et M. Burger, John Wiley & Sons, 1985.

Chemical waves and patterns, sous la direction de R. Kapral et K. Showalter, éditions Kluwer, 1995.

V. CASTET, E. DULOS, J. BOISSONADE et P. De KEPPEL, *Experimental evidence for sustained standing Turing-type non equilibrium chemical pattern*, in *Physical Review Letters*, n° 64, pp. 2953-2956, 1990.

P. De KEPPEL, J.J. PERRAUD, B. RUDOVICS et E. DULOS, *Experimental study of stationary Turing patterns...* in *International Journal of Bifurcation and Chaos*, n° 4, pp. 1215-1231, 1995.

INTERNET

Les promesses seront-elles tenues?

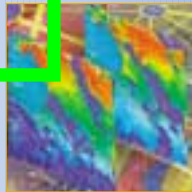
42

L'Internet :
du chaos à l'ordre?



44

La recherche
d'information
Clifford Lynch



49

Les bibliothèques
numériques
Michael Lesk



52

Le filtrage
d'information
Paul Resnick



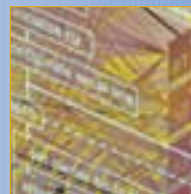
55

Le multilinguisme
Bruno Oudet



Les interfaces
de recherche
Marti Hearst

57



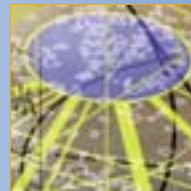
Les systèmes
sécurisés
Mark Stefik

62



Transferts rapides
Jacques Dupraz

66



Les archives
d'un réseau actif
Brewster Kahle

68



L'Internet : du chaos à l'ordre ?

Le réseau Internet est victime de son succès : en quelques années, ce système, initialement confidentiel, de communications entre scientifiques ou ingénieurs est devenu un carrefour inévitable, emprunté par des personnes du monde entier, dans des secteurs aussi variés que l'analyse financière ou la haute couture. Pour remédier à la saturation du réseau, le gouvernement américain a même annoncé son intention de construire un réseau réservé aux scientifiques : l'Internet II.

Comment mettra-t-on le réseau existant au service du grand public? Le courrier électronique, voire les vidéoconférences, sont déjà répandus, mais ces applications sont bien en deçà de ce que le réseau mondial, le World Wide Web, peut offrir : la connexion, par le téléphone ou par des lignes spécialisées, des divers ordinateurs du monde a engendré la constitution d'une gigantesque mine d'informations et d'analyses, la base de données de toutes les bases de données. Les inquiétudes sur l'avenir d'Internet, qui portent habi-



tuellement sur les temps de chargement prohibitifs et sur les limitations d'accès dus à la surcharge du réseau, ne sont que des « douleurs de croissance », qui se résoudront. En revanche, on n'utilisera bien le réseau que si l'on parvient à structurer à stocker et à classer l'information qui y circule.

Dans les pages qui suivent, des informaticiens expliquent comment l'organisation du savoir rendra l'Internet réellement efficace. À partir de points de vue variés, ils cherchent comment simplifier la recherche de l'information (oui, de nouveaux moteurs de recherche faciliteront l'exploration du réseau). Ils examinent les meilleurs moyens de structurer et d'afficher les données, de sorte que chacun (y compris les aveugles) accède facilement à l'information, de toutes les manières imaginables. Les solutions techniques qu'ils proposent ne sont peut-être pas celles qui seront finalement adoptées, mais leurs idées susciteront certainement des débats.

La structuration d'un milieu fondamentalement désordonné comme le réseau mondial contribuera peut-être à réaliser le rêve des encyclopédistes français du XVIII^e siècle : réunir en un seul lieu toutes les connaissances du monde. Deux siècles après eux, Vannevar Bush, qui dirigea le bureau américain de la recherche scientifique et technique durant la Seconde

Guerre mondiale, proposa le « memex », un poste de travail comprenant un lecteur de microfilms et quantité de films qui auraient été l'équivalent d'une bibliothèque de recherche complète ; le lecteur du memex aurait pu lier entre elles et annoter des informations provenant de films différents. Les idées de Bush influencèrent Ted Nelson, l'inventeur du système de l'hyperespace, qui fut finalement introduit sur le réseau. Le dynamisme intellectuel qui court, des encyclopédistes à T. Nelson, se retrouve dans les articles qui suivent.

Leurs auteurs proposent les grandes orientations techniques qui pourraient conduire à la constitution d'un fonds complet du savoir humain. Le réseau Internet deviendrait ainsi un lieu où les rêves d'Homère, de Shakespeare et de Lao-tseu seront à un clic de souris des menus des cantines scolaires ou de l'ordre du jour du prochain conseil municipal. Toutes les activités humaines seront ainsi représentées, des plus nobles aux plus communes.

Retrouvez les articles de ce dossier avec des informations complémentaires et des liens sur notre site Web <http://www.pourlascience.com>

Jeff Brice



La recherche d'informations

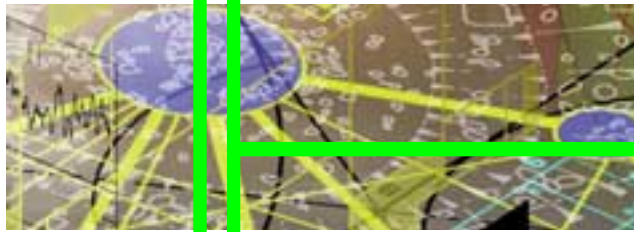
CLIFFORD LYNCH

Les bibliothécaires devront s'allier aux informaticiens pour que cesse l'anarchie qui règne sur l'Internet.

Certains prétendent que le réseau Internet est la bibliothèque mondiale de l'ère numérique. Cette idée ne résiste pas à l'examen. L'Internet, et en particulier l'ensemble de ressources multimédia qui constitue le World Wide Web, ou réseau mondial, n'ont pas été conçus pour servir de support à la publication et à la recherche de l'information. C'est plutôt une bibliothèque chaotique de l'ensemble des publications sortant des « presses » numériques de la planète. Cette mine d'informations contient non seulement des livres et des articles, mais aussi des données scientifiques, des menus, des comptes rendus de conférences, des publicités, des enregistrements audio et vidéo et des transcriptions de conversations interactives. L'anecdote et l'éphémère sont jetés pêle-mêle dans l'important et le durable.

En somme, l'Internet n'a rien d'une bibliothèque numérique. Il ne se développera et ne deviendra un nouveau moyen de communication universel que si l'on met au point des services analogues à ceux des bibliothèques classiques pour organiser l'information, la conserver et la retrouver. Même alors, l'Internet ne ressemblera pas à une bibliothèque classique, car son contenu restera dispersé. Les bibliothécaires, qui choisissent et classent les ouvrages, devront être épaulés par des informaticiens, qui mettront au point des techniques d'indexation et de stockage automatisés de l'information. Seule une synthèse de ces deux professions assurera la viabilité de ce nouveau média.

Aujourd'hui, la structuration de l'information sur l'Internet repose essentiellement sur l'informatique. En théorie, les programmes qui classent et indexent



Jeff Brice

automatiquement des données numériques peuvent gérer la surabondance d'information présente sur l'Internet. De surcroît, l'indexation automatique, peu onéreuse, est préférée à l'indexation humaine, lente et coûteuse.

Toutefois, ces programmes classent l'information différemment de nous. En un sens, le travail effectué par les divers outils automatiques d'indexation et de catalogage, les moteurs de recherche, est extrêmement démocratique : il donne un accès uniforme, non hiérarchisé, à toutes les données présentes sur le réseau. Dans la pratique, cet égalitarisme électronique a ses avantages et ses inconvénients. Les « surfeurs » du réseau qui cherchent une information se retrouvent souvent submergés par des milliers de réponses. De plus, les résultats d'une recherche renvoient fréquemment à des sites Web (un site Web est un ensemble de pages enregistrées dans la mémoire d'un ordinateur du réseau sans rapport avec la demande et omélanges d'autres sites contenant des informations pertinentes.

Arpenter le réseau

Les spécificités de l'indexation électronique apparaissent quand on examine comment les moteurs de recherche, tels *AltaVista*, de la Société *Digital Equipment*, ou *Lycos*, construisent leurs index et cherchent l'information réclamée par un utilisateur. Ces moteurs envoient périodiquement des programmes nommés « robots collec-

teurs » sur tous les sites qu'ils identifient sur le réseau. Ces robots récupèrent les pages, puis un logiciel en extrait une indexation qui assurera leur description. Selon le moteur, cette dernière procédure varie de la simple localisation de la plupart des mots présents dans les pages à l'analyse complexe, assortie d'une identification des mots et des groupes de mots importants. Ces données sont ensuite stockées dans la base de données du moteur de recherche, avec une adresse, une URL (*Uniform Resource Locator*, soit « localisateur unifié de ressources »), qui localise le document. Pour soumettre ses demandes à la base de données du moteur de recherche, le demandeur utilise un navigateur – tel le programme *Netscape* – qui lui donne une liste de ressources, les URL, sur lesquels il peut cliquer pour se connecter aux sites repérés par le moteur de recherche.

Aujourd'hui, les moteurs de recherche traitent quotidiennement des millions de demandes d'information. Cependant, ces moteurs sont loin d'être des outils si efficaces pour s'y retrouver dans la masse d'informations, sans cesse croissante, disponible sur l'Internet. Contrairement aux indexeurs humains, les moteurs de recherche cernent mal les caractéristiques globales d'un document, telles que le sujet ou le genre – poème, pièce de théâtre, voire publicité.

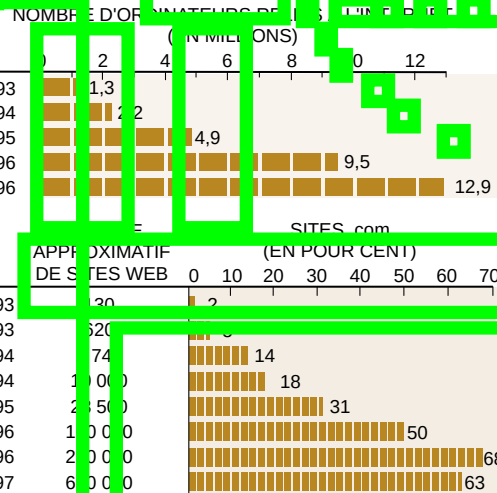
En outre, le réseau mondial ne dispose pas encore de normes qui faciliteraient l'indexation automatique : les documents qu'il contient ne sont pas structurés, de sorte que les programmes ne peuvent en extraire l'information qu'un indexeur humain trouverait par un simple examen superficiel, comme l'auteur, la date de publication, la longueur et le sujet d'un texte (ces infor-

DOSSIER INTERNET

mations sont des «métadonnées»). Un moteur retrouverait certainement le dernier livre de Jacques Martin, par exemple, mais il récupérerait également des milliers d'autres documents dont le texte ou les références bibliographiques contiennent ce nom courant.

Les éditeurs abusent parfois de ce manque de discernement de l'indexation automatique. Leur site sera plus fréquemment consulté s'ils ont placé dans leurs documents des mots, tels que «sexes», qui sont fréquemment demandés. En effet, les moteurs de recherche affichent en premier les adresses des documents qui mentionnent le plus fréquemment le mot clé recherché. Un individu qui se préoccuperait des thèmes ne se laisserait pas bernier.

Les spécialistes de l'indexation savent décrire les contenus de toutes sortes de pages, du texte au document vidéo, et exprimer comment ces composants s'intègrent dans une base de données informative. Ils sauraient, par exemple, regrouper des photographies de la Première Guerre mondiale et des musiques d'époque ou des journaux intimes de soldats. Un



1. LA CROISSANCE ET LES TRANSFORMATIONS de l'Internet se mesurent au nombre d'ordinateurs branchés sur l'Internet et des sites connectés.

indexeur humain sait également décrire les règles qui régissent l'organisation d'un site qui archiverait des programmes pour *Macintosh*, par exemple. L'analyse des objectifs d'un site, de son histoire et de sa politique d'organisation dépasse les capacités d'un moteur de recherche.

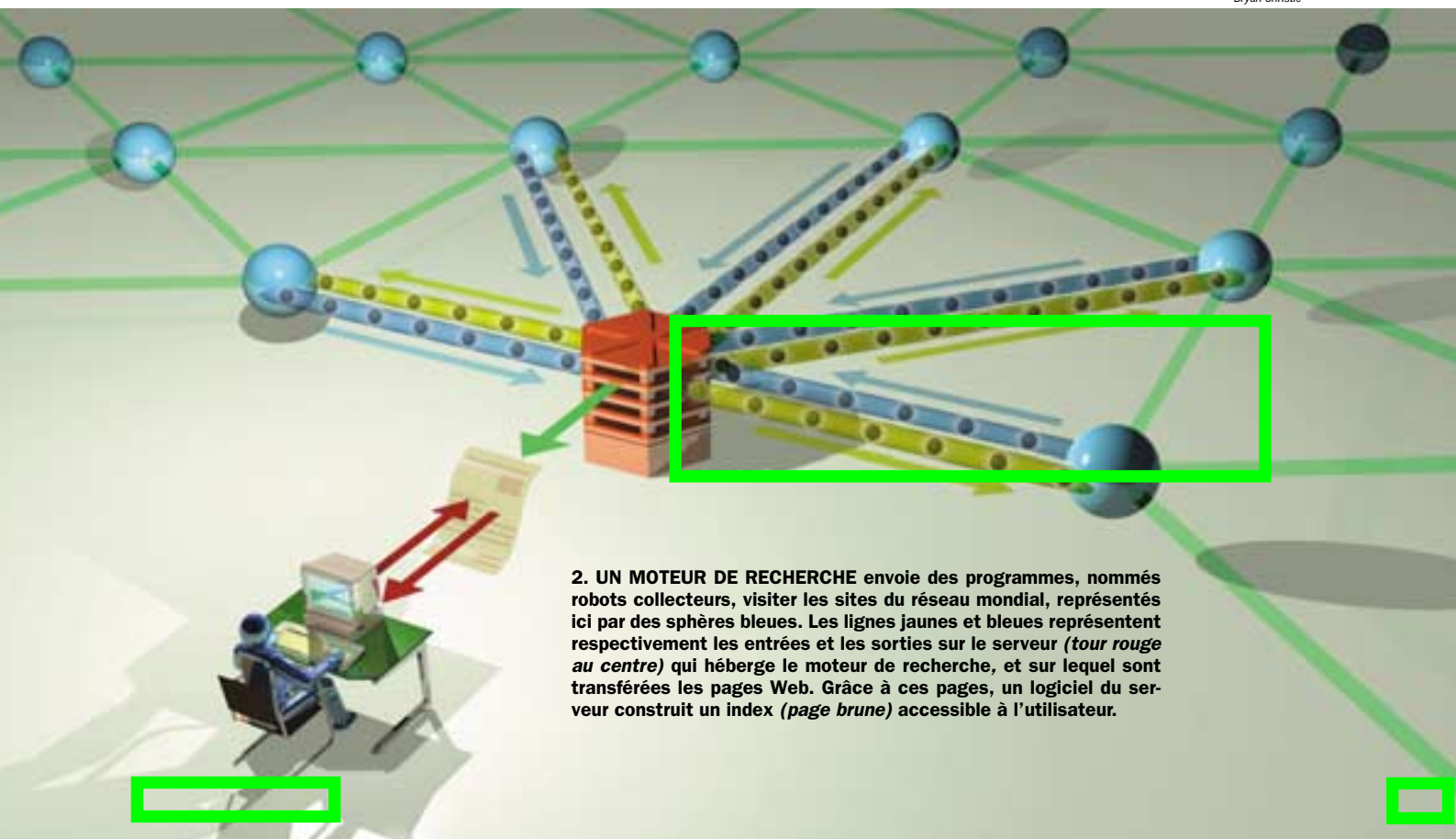
De surcroît, la plupart des moteurs de recherche ne reconnaissent que le texte. Or les utilisateurs du réseau y cherchent fréquemment des images, fixes ou animées. Certains programmes

retrouvent aujourd'hui des couleurs ou des motifs présents sur des images (voir l'encadré des deux pages suivantes), mais aucun programme ne sait déterminer le sens et l'importance culturelle d'une image et reconnaître, par exemple, qu'un groupe d'hommes attablés représente la Cène.

Enfin, de nombreux sites utilisent aujourd'hui une nouvelle structuration des données qui empêche les moteurs de recherche de les analyser : le nombre de pages ne sont plus des fichiers statiques que l'on peut analyser et indexer facilement, mais des pages créées dynamiquement lors de l'affichage, en réponse à la recherche d'information de l'utilisateur. Par exemple, lorsqu'on sur le site d'un journal, un utilisateur demande un article concernant le commerce du pétrole, un programme créera la page avec des cartes, des tableaux et un texte provenant de diverses parties de sa base de données, sans que l'on puisse ni consulter, ni indexer cette base de données.

Un nombre croissant d'informaticiens étudient les méthodes de classification automatisée. L'une des approches

Bryan Christie



2. UN MOTEUR DE RECHERCHE envoie des programmes, nommés robots collecteurs, visiter les sites du réseau mondial, représentés ici par des sphères bleues. Les lignes jaunes et bleues représentent respectivement les entrées et les sorties sur le serveur (tour rouge au centre) qui héberge le moteur de recherche, et sur lequel sont transférées les pages Web. Grâce à ces pages, un logiciel du serveur construit un index (page brune) accessible à l'utilisateur.

explorées, consiste à attacher des métadonnées aux fichiers, de sorte que les systèmes d'indexation obtiennent directement ces informations. Les travaux les plus avancés sont ceux du programme *Dublin Core Metadata* et du projet *Warwick Framework* – le premier ainsi nommé d'après un atelier de travail qui eut lieu à Dublin, dans l'Ohio, le second d'après un colloque qui s'est tenu à Warwick, en Angleterre. Ces groupes de travail ont défini un ensemble de métadonnées plus simples que celles qui sont classiquement utilisées pour constituer les catalogues de bibliothèques et ont mis au point des méthodes pour intégrer les métadonnées dans les pages du réseau.

Ces métadonnées contiendraient, par exemple, le titre d'un document,

son auteur ou son genre (texte, vidéo, etc.). Elles pourraient être produites manuellement ou par des logiciels d'indexation automatique. Par ses annotations précises et détaillées, la description donnée par l'être humain reste bien supérieure à celle qui est obtenue par un programme d'indexation automatique.

Lorsque les coûts sont justifiés, des indexeurs humains compilent laborieusement les bibliographies de certains sites. *Indexing by Humans*, par exemple, répertorie les sites en fonction de rubriques très générales. Dans un projet de recherche de l'université du Michigan, on cherche à mettre au point une description de sites contenant des informations spécifiquement destinées aux chercheurs.

Plus qu'une simple bibliothèque

Les stratégies adoptées pour la recherche et l'indexation (humaine ou automatisée) de documents dépendront des utilisateurs d'Internet et des perspectives commerciales offertes aux éditeurs. Nombre de chercheurs souhaitent conserver une bibliothèque numériquement structurée, mais, pour d'autres, un média démocratique et libre serait le support idéal pour la diffusion de l'information. Certains utilisateurs, tels les analystes financiers et les espions, souhaitent un accès illimité aux bases de données brutes, libre de tout contrôle. Pour eux, les moteurs de recherche standards offrent de réels avantages, car ils ne filtrent pas les données.

La recherche d'images sur le Web

Depuis quelques années, le public découvre que le réseau Internet lui offre des photographies, des animations, des graphiques, des sons et des films consacrés à des sujets variés, du grand art à la franc-maçonnerie, de la pornographie à la violence obscénité. Malgré cette surabondance d'informations, la recherche d'un document, parmi des centaines de milliers de sites, repose essentiellement, aujourd'hui encore, sur des index de mots et de nombres.

Si l'on recherche «drapeau français» sur le moteur de recherche *AltaVista*, on obtient l'image souhaitée, à condition qu'elle ait été légendée avec ces deux mots. Mais comment quelqu'un qui connaît seulement l'aspect du drapeau peut-il retrouver son pays d'origine ?

Le réseau serait utile si les moteurs de recherche permettaient de dessiner ou de numériser un rectangle composé de trois bandes verticales colorées en bleu, en blanc et en rouge, et s'ils trouvaient toutes les images correspondantes stockées sur la myriade de sites. Ces dernières années, des techniques combinant indexation par mots clés et analyse d'images ont ouvert la voie aux premiers moteurs de recherche d'images.

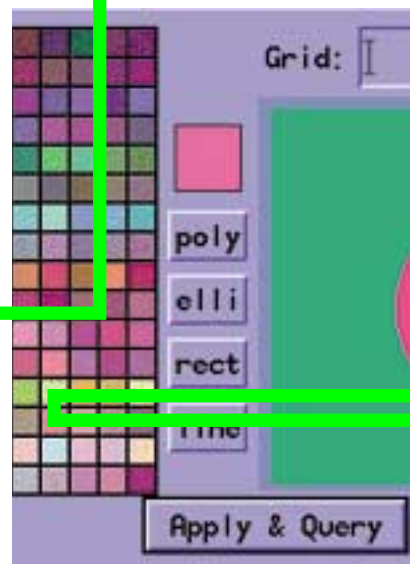
Bien que ces prototypes soient des pionniers de l'indexation graphique, ils montrent à quel point les outils actuels sont rudimentaires et fondés sur l'usage du texte. *WebSEEK*, un logiciel expérimental conçu à l'Université Columbia, illustre le fonctionnement d'un moteur de recherche d'images. Il commence par charger les fichiers trouvés en visitant les sites, puis tente de localiser les noms de fichiers contenant des acronymes, tels que GIF ou MPEG, désignant un contenu graphique ou vidéo. Il cherche également, dans ces noms de fichiers, des mots qui pourraient identifier le sujet des fichiers. Lorsque *WebSEEK* trouve une image, il détermine ses couleurs prépondérantes et leurs positions. À l'aide de ces informations, le programme distingue les photographies, les graphiques, les images en noir et blanc ou en gris. Le logiciel comprime également chaque image et la transforme en une icône miniature qu'il pourra afficher. Pour une vidéo, le programme *WebSEEK* extrait des images de plusieurs scènes.

Un utilisateur commence sa recherche en choisissant une catégorie dans un menu – par exemple, «chats». *WebSEEK* affiche alors un échantillon d'icônes associées à la catégorie «chats». Pour limi-

ter sa recherche, l'utilisateur peut cliquer sur toute icône montrant des chats noirs. Grâce à l'analyse de couleurs précédemment effectuée, le moteur de recherche cherche des correspondances avec des images ayant un profil de couleur similaire. Il présente alors un nouveau lot d'images qui représentent des chats noirs – mais aussi, par exemple, quelques chats jaune et orange assis sur des coussins noirs. L'utilisateur peut alors affiner sa recherche en ajoutant ou en excluant certaines couleurs d'une image avant de relancer la recherche. En excluant le jaune et l'orange, il fait disparaître les chats colorés. Plus simplement, l'utilisateur peut aussi désigner les images qui ne contiennent pas de chats noirs, indiquant par là au programme de ne pas rechercher ce type d'image. À ce jour, *WebSEEK* a transféré et indexé plus de 650 000 images provenant de dizaines de milliers de sites.

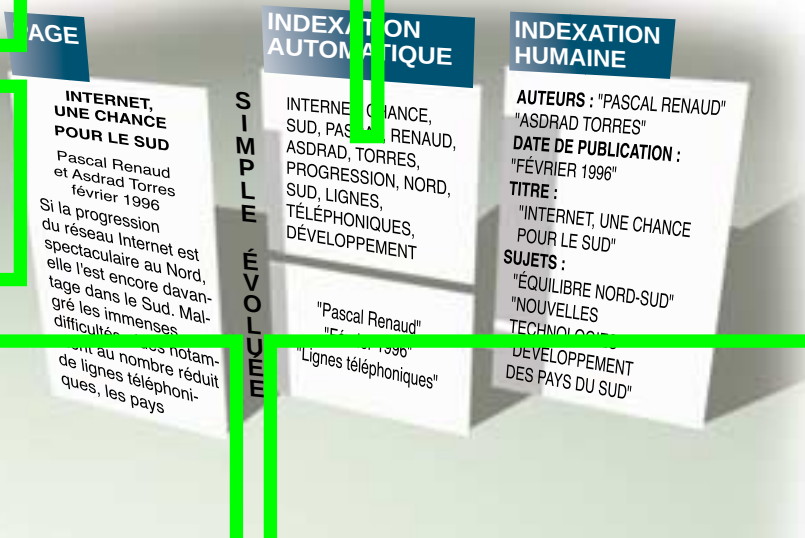
Plusieurs centres informatiques et quelques sociétés, telles qu'*IBM* et *Virage*, mettent au point des programmes de recherche d'images sur des réseaux privés ou dans des bases de données. Deux autres sociétés, *Excalibur Technologies* et *Interplex Software*, se sont associées pour fournir des logiciels aux moteurs de recherche Yahoo et Infoseek.

C'est pourtant l'un des plus anciens programmes de recherche d'images, *CLIC* d'*IBM*, qui fournit les meilleures correspondances entre les motifs des images. Le logiciel *CLIC* repère les couleurs dans une image, et il mesure plusieurs paramètres pour en évaluer la texture : le contraste (le blanc et le noir des rayures de zèbre), le grain (la différence entre les galets et les rochers) et l'orientation (la différence entre les poteaux parallèles d'une clôture et l'isotropie des pétales de fleur). Ce programme



L'information circulant sur l'Internet est bien plus variée que celle des bibliothèques classiques. Une bibliothèque ne classe pas, par ordre de qualité, les ouvrages qu'elle contient. Toutefois, comme l'Internet comprend un volume d'information supérieur, ses utilisateurs veulent utiliser au mieux le temps limité dont ils disposent pour effectuer une recherche. Ils veulent connaître, par exemple, les trois «meilleurs» documents traitant d'un

3. L'INDEXATION AUTOMATIQUE effectuée par un moteur de recherche (**panneau de gauche**) conduit, à partir d'une page d'un article du *Monde diplomatique*, à une liste de mots (**panneau central, en haut**) ou de groupes de mots simples (**panneau central, en bas**). L'indexation humaine (**panneau de droite**) donne des indications plus structurées.



peut également rechercher des formes simples dans les images. Si on lui demande de rechercher des images similaires à un point rose sur un fond vert, il renvoie des fleurs et d'autres photographies contenant des formes et des couleurs analogues (*voir ci-dessous*). Ce logiciel possède plusieurs applications, allant du choix des motifs de papiers peints à l'identification policière de criminels par le type de vêtements.

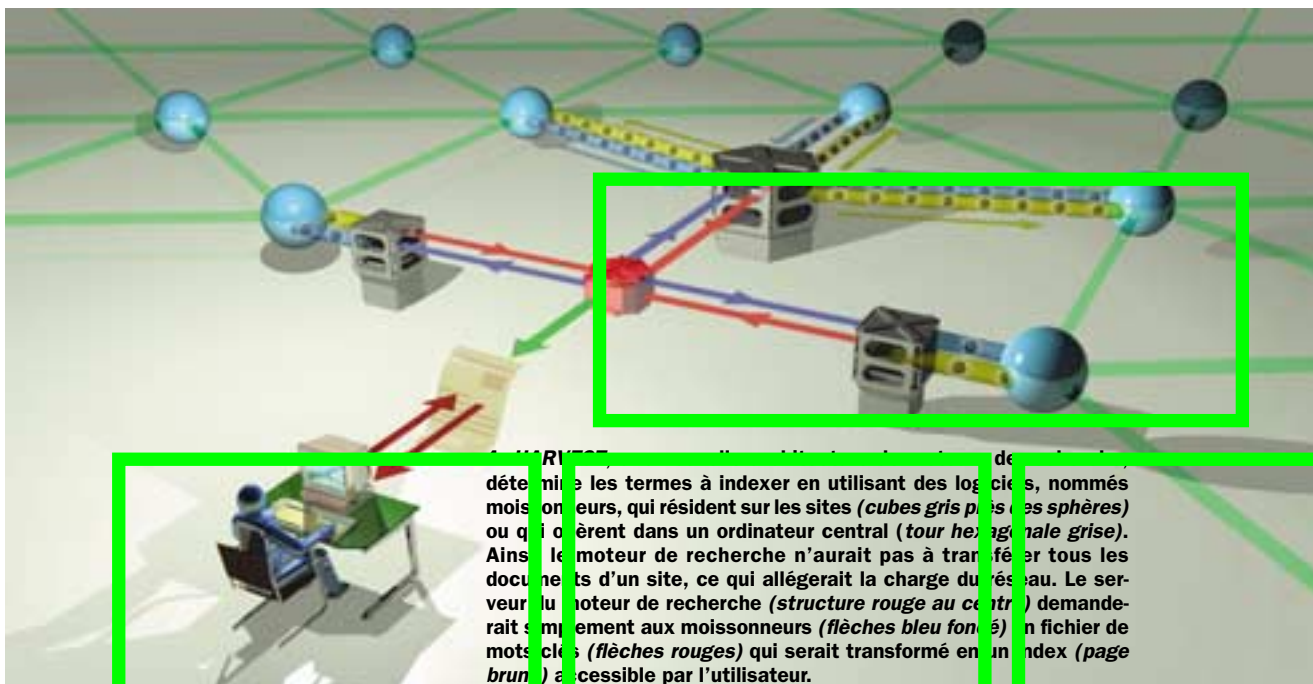
Tous ces programmes cherchent un motif analogue au motif demandé. Ils requièrent encore un observateur humain – ou un texte accompagnateur – pour confirmer si un objet est un chat ou un coussin. Depuis plus de dix ans, des chercheurs en intelligence artificielle essaient de donner aux programmes la possibilité d'établir directement l'identité d'objets présents sur une image. Ils tentent de corréler les formes d'une image avec un modèle géométrique d'objets du monde réel. Les programmes déduisent ensuite, par exemple, qu'un cylindre rose ou brun est un bras humain.

Considérons, par exemple, le logiciel mis au point par David Forsyth, de Berkeley, et par Margaret Fleck, de l'Université d'Iowa,

qui recherche des photographies de personnes nues. Il commence par analyser la couleur et la texture d'une photographie. Lorsqu'il trouve des zones de couleur chair, il enclenche un algorithme qui recherche des zones cylindriques pouvant correspondre à un bras ou à une jambe. Il recherche ensuite d'autres cylindres couleur chair, disposés selon certains angles, qui confirmeraient la présence de membres. Lors d'un essai réalisé à l'automne 1996, le programme a retrouvé 43 pour cent des 565 personnes nues présentes sur un total de 4 854 photos – ce qui constitue un bon résultat pour une analyse d'images aussi complexe. En outre, le programme n'a produit que quatre pour cent de fausses réponses pour un ensemble de 4 289 images qui ne contenaient aucune personne nue.

Une dizaine d'années de recherches sera encore nécessaire avant que les utilisateurs du réseau puissent chercher des images, des corps nus, des chats ou des drapeaux aussi facilement qu'ils recherchent du texte. Les informaticiens espèrent qu'ils mettront au point, lors de cette recherche, des programmes qui collecteront l'information en comprenant ce qu'ils voient.





Byron Christie

sujet donné, sans payer les services d'êtres humains chargés de juger la myriade de sites Web. Une solution, qui fait à nouveau appel à l'être humain, consiste à partager entre utilisateurs l'évaluation des sites. Des systèmes d'évaluation numériques récemment mis au point permettent aux utilisateurs de donner leur sentiment sur les sites particuliers (voir *Le filtrage d'information*, par Paul Resnick, page 52).

Certains moteurs explorent l'Internet et, de surcroît, séparent le bon grain de l'ivraie. Il faudrait toutefois de nouveaux programmes pour décongestionner le réseau lors de l'examen répété des sites. Certains gestionnaires de sites affirment en effet que leurs ordinateurs consacrent bien plus de temps à fournir leurs informations aux moteurs qu'aux personnes qu'ils espèrent séduire par leurs offres.

Pour résoudre ce problème, Mike Schwartz et ses collègues de l'Université de Boulder ont écrit un programme, nommé *Harvest*, qui permet à un site de compiler des données d'indexation de ses propres pages et de transmettre, à la demande, ces informations aux différents moteurs de recherche. Ainsi, grâce à *Harvest*, les moteurs n'ont plus à exporter la totalité des sites. Alors que les moteurs de recherche téléchargent un exemplaire de chaque page visitée dans leurs sites d'origine pour en extraire les

termes qui constituent un index, ce qui engorge le réseau, *Harvest*, le «programme moissonneur», n'envoie qu'un fichier de termes indexés. En outre, comme il transmet uniquement l'information concernant les pages qui ont été modifiées depuis sa dernière visite, il évite d'engorger le réseau et les ordinateurs qui lui sont connectés.

Les programmes moissonneurs pourraient également aider les éditeurs à limiter l'information qui quitte leurs sites. Ce contrôle se révèle nécessaire, car le réseau n'est désormais plus un simple support de libre circulation de l'information : il devient progressivement un moyen d'accéder, contre paiement, à des informations protégées dont la lecture n'est pas forcément autorisée pour les utilisateurs. Les moissonneurs, eux, distribueraient uniquement l'information que les éditeurs offrent gratuitement, tels les sommaires et des extraits de l'information stockés sur leurs sites.

Les besoins des utilisateurs déterminent les méthodes de collecte d'information qui seront mises en œuvre. Il est encore trop tôt pour dire si l'Internet ressemblera alors à une bibliothèque, avec des collections structurées, ou s'il restera anarchique, avec un accès fourni par des systèmes automatisés.

Si les utilisateurs acceptent de payer pour protéger le travail des auteurs, alors les éditeurs, les indexeurs et les critiques privilégiés

ront l'information structurée du type bibliothèque classique. En revanche, si l'information est fournie gratuitement ou subventionnée, l'indexation numérisée, peu coûteuse, l'emportera très probablement, et l'environnement anarchique qui caractérise aujourd'hui une grande partie de l'Internet subsistera. Ainsi, plutôt que des problèmes techniques, ce seront surtout des problèmes économiques et sociaux qui détermineront la forme que prendra, dans l'avenir, la recherche de l'information sur l'Internet.

Clifford L. LUNCH est informaticien à l'Université de Californie.

C.M. FLOWMAN et al., *The Harvest Information Discovery and Access System*, in *Computer Network and ISDN Systems*, vol. 23, n°s 1-2, pp. 119-125, décembre 1995.

Des informations sur le programme *Harvest* sont disponibles à l'adresse Web <http://harvest.transarc.com>

Lorca DE MURPHY et Stuart L. WEIBEL, *The Warwick Metadata Workshop: A Framework for the Deployment of Resource Description*, in *D-lib Magazine*, juillet-août 1996. Les comptes rendus de cette conférence sont disponibles sur <http://www.dlib.org/dlib/july96/07contents.html>

Carl LAGOZE, *The Warwick Framework: A Container Architecture for Diverse Sets of Metadata*, *ibid.*

Les bibliothèques numériques

MICHAEL LESK

La quantité d'informations disponible sur l'Internet sera très inférieure à celle des futures bibliothèques. Toutefois, la construction de ces géants ne sera pas aisée.

À Paris, au bord de la Seine, quatre tours dominent le quartier de Tolbiac : avec leurs 395 kilomètres de rayonnages, elles pourront recevoir jusqu'à 22 millions de livres. La bibliothèque François-Mitterrand pourrait être la dernière et la première du genre. La dernière, car la plupart des grandes villes n'ont plus les moyens de construire des bâtiments publics aussi ambitieux. La première, car son installation s'achèvera avec le branchement de centaines d'ordinateurs, qui donneront au public un accès électronique immédiat aux textes de 100 000 ouvrages couvrant une grande part de l'histoire et de la culture françaises.

Dans le monde entier, des bibliothèques se sont lancées dans la tâche herculéenne de numériser des livres, des images et des sons, qui forment la mémoire culturelle de l'humanité. Les utilisateurs des bibliothèques devraient bientôt disposer, sans quitter leur bureau, d'une quantité d'informations bien plus considérable que celle qui est aujourd'hui présente sur l'Internet. Cependant, les nombreux obstacles légaux, économiques et techniques rendent cette perspective encore incertaine.

Les bibliothécaires voient trois avantages évidents à la numérisa-

tion. Premièrement, elle leur permettra de préserver des documents fragiles et rares sans en restreindre l'accès. La British Library de Londres, par exemple, détient le seul manuscrit existant du *Laide Boewulf* (un poème épique anglo-saxon, d'auteur inconnu, écrit entre les VIII^e et X^e siècles) ; seuls des spécialistes étaient autorisés à le consulter jusqu'à ce que Kevin Kiernan, de l'Université du Kentucky, ne numérise ce manuscrit sous trois lumières différentes (révélant des détails qui n'apparaissent pas à l'œil nu) et ne mette ces images sur le réseau Internet. De même, la bibliothèque du Parlement japonais est en train de réaliser des clichés numériques, extrêmement détaillés, de 1 236 blocs de bois imprimés, rouleaux et autres matériels qu'elle considère comme des trésors nationaux, afin que les chercheurs puissent les examiner sans manipuler les originaux.

Le deuxième avantage est la commodité : les usagers accèdent aux informations en quelques secondes, au lieu de perdre des heures dans les bibliothèques. Plusieurs personnes peuvent lire simultanément le même livre ou regarder la même image. Les bibliothécaires n'ont plus à remplacer les ouvrages sur les rayons.

Le troisième avantage des copies électroniques est d'occuper un espace de quelques millimètres sur un disque magnétique – au lieu de mètres sur des rayonnages. La construction des bâtiments d'une bibliothèque est de plus en plus coûteuse : la bibliothèque François-Mitterrand coûtera plus de sept milliards de francs ; le stockage de chaque volume reviendra en moyenne à 300 francs (dans des bâtiments moins ambitieux, le coût moyen de stockage varie autour de 150 francs). À titre de comparaison, le prix du stockage sur disque revient à environ dix francs pour une publication de 300 pages et ne cesse de diminuer.

Des compromis techniques

La numérisation sera progressive, car chacune des techniques de numérisation est un compromis entre la conservation, la commodité et le coût. La numérisation des pages en vue d'une création d'images numériques est l'opération la moins coûteuse. Elle revient à environ 200 francs par volume, la majeure partie de cette dépense servant à payer les salaires des personnes qui utilisent le scanner. La technique du *photoCD* de Kodak, qui numérise automatique-

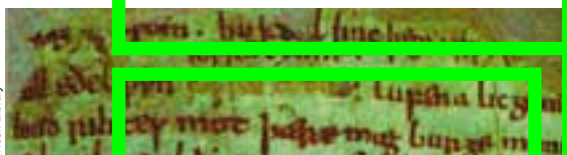
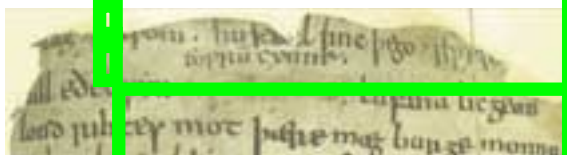
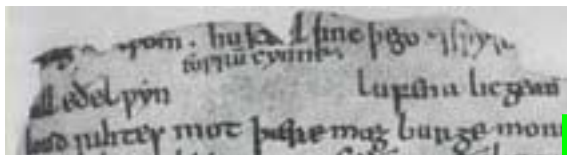


Agence France-Presse



Michel Gauguier, Agence France-Presse

1. LES TOURS de la bibliothèque François-Mitterrand, dans le 13^e arrondissement de Paris (à gauche), ont une capacité de 22 millions de livres. Cependant, 100 000 de ces ouvrages, stockés sous forme d'images numérisées, n'occuperont qu'une place infime et seront instantanément accessibles sur des ordinateurs installés dans les salles de lecture.



British Library

2. LE LAI DE BEOWULF est éclairé en lumière naturelle (en haut), par l'arrière (au milieu) et en lumière ultraviolette (en bas). Ces images numérisées sont aujourd'hui disponibles sur l'Internet (<http://www.uky.edu/%7Ekiernan>). Elles révèlent des détails qui ne sont pas immédiatement perceptibles sur l'original, conservé à la British Library de Londres.

ment les négatifs photographiques, abaisse considérablement ce coût. Grâce à la *photo CD*, l'Université Harvard a numérisé 10 000 affiches de son fonds juif au rythme de 1 000 par jour et pour seulement dix francs par affiche. Les bibliothèques étant constamment à court d'argent, la plupart des documents qui seront numérisés – notamment 100 000 livres de la bibliothèque François-Mitterrand et cinq millions de titres de la bibliothèque du Congrès américain – le seront de cette façon.

Cette méthode est un bon moyen de conservation, car elle rend fidèlement tout l'aspect du livre et toutes les notes manuscrites qui s'y trouvent ; en outre, sur des images à haute résolution, elle révèle des aspects de fabrication imperceptibles à l'œil nu. En contrepartie, on doit stocker des fichiers informatiques encombrants : une carte de 40 centimètres sur 80 centimètres, avec des caractères de seulement un millimètre de haut ne reste lisible que si l'image comporte 4 500 × 9 300 pixels, ce qui correspond à un fichier de 125 méga-octets, qui saturerait un ordinateur personnel. On résoudra cette difficulté en utilisant des ordinateurs puissants et de nouveaux formats d'image, qui permettront la visualisation à des résolutions inférieures lorsque la haute résolution n'est pas nécessaire.

Toutefois les textes des images ainsi numérisées ne peuvent être traités : seule leur lecture est possible. Com-

ment, alors, retrouver facilement une citation ou un passage enfouis dans un livre numérisé ? En outre, ces images sont si grosses qu'on ne peut ni les transmettre par courrier électronique ni les « copier-coller » dans un document de travail. Enfin ces images ne sont pas manipulables par les non-voyants. Dans de nombreux cas, le texte électronique – manipulable et indexable par des programmes de traitement de texte – est plus pratique que des images numérisées. Les logiciels de reconnaissance de caractères transforment le texte imprimé en texte électronique. Ces logiciels, qui utilisent des techniques de reconnaissance de formes pour extraire, dans des images numérisées, des mots lettre par lettre, sont devenus bien moins coûteux et un peu plus précis que naguère. Aujourd'hui, les meilleurs d'entre eux identifient correctement plus de 99 pour cent des caractères d'images tests standards, ce qui signifie qu'ils font encore une dizaine d'erreurs par page. Cette proportion d'erreurs est acceptable si les textes convertis sont seulement indexés ; quand on doit corriger les erreurs (à la main), la numérisation revient au moins aussi cher que la numérisation au scanner.

La Fondation Andrew Mellon a utilisé cette dernière approche pour la numérisation de dix grandes revues d'histoire et d'économie. Bien qu'il en coûte deux francs par page numérisée, corrigée à la main et traitée par un programme de reconnaissance de caractères – soit 600 francs pour un livre de 300 pages –, la Fondation pense rentrer dans ses fonds grâce aux coûts réduits du catalogage et du stockage : sous la forme de fichiers textes, les livres occupent dix fois moins de place que les fichiers images correspondants. En outre, cet investissement permettra aux lecteurs de retrouver bien plus rapidement les articles qui les intéressent.

Pour numériser les livres illustrés, les bibliothèques doivent numériser les textes, d'une part, les dessins et pho-

tographies, d'autre part. Les illustrations provoquaient des erreurs dans la plupart des programmes de reconnaissance de caractères. Cependant, de nouveaux logiciels identifient aujourd'hui automatiquement les illustrations et permettent de les conserver en tant qu'images, qui sont ensuite replacées aux endroits appropriés du texte électronique. Cette technique, utilisée par la société américaine de chimie pour extraire environ 400 000 diagrammes et figures des revues de chimie, repose sur les différences de densité de l'encre sur la page, selon qu'elle correspond à du texte ou à une image : le texte obscurcit la page de manière uniforme et prévisible, tandis que les illustrations apparaissent généralement moins foncées et irrégulières (voir la figure 3).

La méthode de numérisation d'un texte la plus lente est sa saisie sur un clavier. C'est également la méthode la plus coûteuse, même si des entreprises asiatiques emploient des milliers de clavistes sous-payés pour saisir des ouvrages volumineux. La saisie, surtout lorsqu'elle est effectuée par une personne ignorant la langue qu'elle copie, reproduit généralement les fautes d'orthographe et les particularités de l'original qui sont souvent « corrigées » à l'origine par le programme de reconnaissance de caractères. Quant aux ouvrages où plusieurs polices de caractères ont des sens spéciaux, la saisie directe est le seul moyen de les numériser. En raison de son coût, la généralisation de cette dernière n'est pas envisageable : la saisie d'un texte standard de 300 pages revient à 3 000 francs ; la description de sa mise en page par le langage hypertexte HTML (*Hypertext Markup Language*, le langage informatique utilisé sur le réseau mondial) ou par l'un de ses nombreux cousins, atteint 4 500 francs, soit 30 fois plus que la simple numérisation des pages.

Aujourd'hui, la plupart des nouveaux documents achetés par les bibliothèques proviennent d'ordinateurs. Aussi les bibliothèques négocient-elles l'obtention des données sur des CD-ROM ou sur d'autres supports informatiques, afin d'éviter le recours à la numérisation. L'Institut des ingénieurs en électricité et en électronique (IEEE), par exemple, programme les 62 revues qu'il publie en langage HTML pour une lecture à

distance. Comme les usagers utilisent plus souvent les documents récents des bibliothèques que les documents anciens, je pense que, vers l'an 2000, la moitié du matériel accessible dans la plupart des grandes bibliothèques sera numérisée. Dix ans supplémentaires seraient probablement nécessaires pour que les bibliothèques plus petites suivent le mouvement.

Les incertitudes de l'avenir

Cette transition n'est pas sans risques. Dans les années 1980, quand nombre de bibliothèques entreprirent de numériser leurs ouvrages, les bibliothécaires observèrent que les usagers ignoraient progressivement les titres qui n'étaient pas numérisés. Ainsi, bien qu'elle ait pour ambition de favoriser la culture, la numérisation risque de l'étouffer temporairement.

Le problème des droits d'auteur est également épineux. Lorsque la Société IBM prépara un CD-ROM pour célébrer le 500^e anniversaire du voyage de Christophe Colomb, elle dut dépenser cinq millions de francs pour obtenir les droits de reproduction nécessaires. Jusqu'ici, la plupart des bibliothèques ont évité les difficultés en ne numérisant que des documents publiés avant 1920 (et donc entrés dans le domaine public). La bibliothèque du Congrès américain, par exemple, a numérisé des milliers de photographies de la guerre de Sécession, des documents du Congrès continental et des discours de la Première Guerre mondiale, mais pas *Autant en emporte le vent*. Lorsque, pour aider les pays en développement, l'Université Cornell décida de numériser les principaux titres de la littérature agronomique parus entre 1850 et 1950, elle évita soigneusement tous les livres protégés par les droits d'auteur.

Si les lois n'autorisent pas les bibliothèques à manipuler des œuvres numérisées aussi facilement que les livres et les revues, les usagers disposeront, sous forme numérique, de tous les documents anciens qu'ils desireraient, mais ils ne trouveront les livres publiés entre 1920 et 1990 que sous des vêtements commodes. Alors, justifier les demandes de crédits de numérisation ? En 1996, *Autant en emporte le vent* a été beaucoup plus consulté par le public américain que n'importe quel discours de la Première Guerre mondiale ; numériser d'abord

les ouvrages les plus lus serait une bonne manière d'obtenir un soutien populaire.

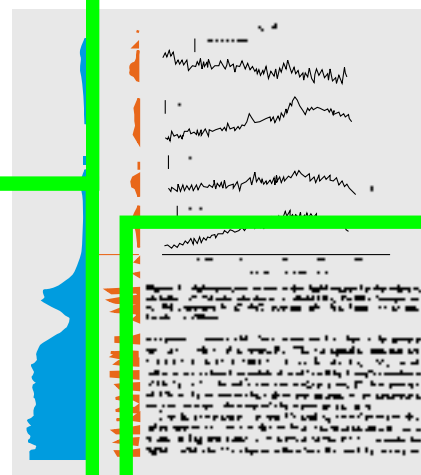
À défaut de ce soutien, des institutions pourraient s'associer pour mettre en commun sur l'Internet leurs collections virtuelles, en se répartissant le coût de création de ces collections. Toutefois, ces problèmes d'ordre politique et administratif ont jusqu'ici contrarié les tentatives de coopération : quels doivent être les services offerts par les bibliothèques aux gens qui en sont éloignés ? Comment répartir équitablement les frais d'achat et de stockage des documents entre différentes institutions ?

Lorsque ces obstacles seront surmontés et lorsque seront numérisés des millions de livres, d'images et d'enregistrements, nos enfants pourront-ils les trouver, les voir, les explorer, les imprimer ? Le problème n'est pas tant la durabilité des matériaux physiques que l'obsolescence technique (voir *L'archivage des documents informatiques*, par Jeff Rothenberg, *Pour la Science*, n° 209, mars 1995). Tous les quatre ou cinq ans, les bibliothécaires devront adapter leurs collections aux formats de nouveaux dispositifs. La copie de fichiers d'un dispositif à un autre ne devrait guère poser de difficultés – un bit est un bit –, mais, face à l'abondance et à la constante évolution des formats, on peut être rapidement dépassé.

En outre, certains formats ne sont pas traduisibles en d'autres formats sans perte d'information. Certes, les formats du texte et des images sont de plus en plus standardisés, mais certains de ces formats, tel SGML (*Standardized General Markup Language*) pour le texte, ont une définition si approximative qu'il n'existe aucun programme capable d'archiver correctement toutes ses caractéristiques.

Outre la bibliothèque François-Mitterrand, les bibliothèques municipales de Lyon et de Valenciennes ont également un important programme de numérisation. Les bibliothèques ne sont pas les seuls dépositaires de l'information qui peut être numérisée. Leurs problèmes sont également ceux des organismes publics, tels que les Archives nationales, les archives des services médicaux, les entreprises et même les Mormons lorsqu'ils numérisent les archives des naissances et des mariages à travers le monde.

Les travaux de numérisation dureront plusieurs dizaines d'années et



3. L'EXTRACTION DES IMAGES d'un texte numérisé s'effectue automatiquement grâce à un logiciel conçu pour la Société américaine de chimie. Ce logiciel mesure la densité de pixels noirs sur chaque bande verticale de la page entière pour identifier les limites des colonnes. Il mesure ensuite la densité de pixels des lignes horizontales (en orange) et, de plus, à l'aide d'un algorithme, l'espacement régulier séparant les caractères. Le logiciel construit ensuite une fonction (en bleu) qui attribue des valeurs élevées au texte uniformément espacé et des valeurs inférieures aux illustrations. En sélectionnant les régions associées aux faibles valeurs, le système isole les images avec une bonne fiabilité.

coûteront des milliards de francs. De même qu'aujourd'hui nous écoutons des fugues de Bach jouées aussi bien sur un piano que sur un clavecin, que nous lisons les pièces de Molière sur du papier ou les réécrits à voix haute, et que nous regardons un film sur une bande vidéo ou au cinéma, un jour viendra où, grâce aux réseaux, nous serons en mesure d'apprécier, avec un confort inégalé et pour une dépense minime, la richesse de la créativité humaine.

Michael LESK est informaticien aux Laboratoires Bellcore, dans le New Jersey.

Building Large-Scale Digital Libraries, numéro spécial de *Computer*, vol. 20, n° 5, mai 1996.

Michael LESK, *Practical Digital Libraries : Books, Bytes and Bucks*, Morgan Kaufmann (à paraître).

Sur le site de la Bibliothèque nationale de France (<http://www.bnf.fr>), vous trouverez des expositions virtuelles et, en particulier, 1 000 enluminures de l'époque de Charles V.

Le filtrage d'information

PAUL RESNICK

Grâce aux étiquettes, les utilisateurs des réseaux peuvent vérifier si les logiciels et les sites qu'ils découvrent sont intéressants et exempts de virus.

On lit parfois que le réseau Internet est un village planétaire : ses utilisateurs formeraient une communauté gigantesque, mais soudée, partageant des valeurs et des expériences. Cette idée est trompeuse, car si de nombreuses cultures coexistent sur l'Internet, elles sont parfois en conflit. Sur les forums d'Internet, les utilisateurs interagissent, commercialement et socialement, aussi bien avec des étrangers qu'avec des connaissances ou des amis. L'expression «village planétaire» devrait être remplacée par «ville planétaire», qui fait état de plus de possibilités, mais aussi de plus de dangers.

Pour éviter les voisinages les plus gênants ou les plus dangereux, les utilisateurs disposent de procédures de filtrage qui identifient facilement des risques définis. L'une d'elles est l'analyse des services disponibles : par exemple, les logiciels antivirus recherchent des fragments de programme qu'ils savent être courants dans les virus informatiques, et certains services, tels *AltaVista* et *Lycos*, mettent en avant ou interdisent l'accès des documents qui contiennent des mots particuliers. Avec mes collègues, nous proposons une autre technique de filtrage, fondée sur la création d'étiquettes électroniques qui sont ajoutées aux sites pour décrire les œuvres numériques. Ces étiquettes indiquent des caractéristiques subjectives (telle page est crôle ou agressive) ou donnent des informations qui ne sont pas directement évidentes à la lecture des pages, telle la politique du site

sur l'utilisation ou la vente de données confidentielles.

Le Consortium World Wide Web, dont l'entenne européenne est située à l'Institut national de recherche en informatique et en automatique (INRIA), a défini un ensemble de critères techniques nommés PICS (l'acronyme de *Platform for Internet Content Selection*, soit «plate-forme de sélection du contenu d'Internet») qui permettent aux utilisateurs de diffuser électroniquement ces étiquettes sous une forme simple. Les ordinateurs, traitant l'information de ces étiquettes en tâche de fond, protègent automatiquement les utilisateurs contre des documents indésirables ou à l'inverse, attirent leur attention sur des sites particulièrement intéressants. Initialement, ces étiquettes PICS devaient permettre aux parents et aux enseignants de masquer les documents qu'ils estimaient choquants pour des enfants. Plutôt que d'interdire purement et simplement les sites choquants, elles permettent aux utilisateurs de filtrer ce qu'ils reçoivent.

Les dessous des étiquettes

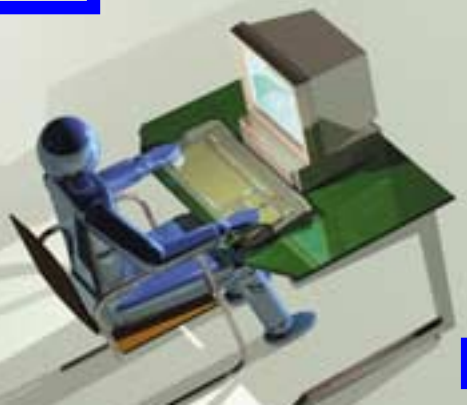
Les étiquettes PICS peuvent décrire toutes les caractéristiques d'un document ou d'un site informatique. Les premières étiquettes repéraient les documents indécents. Par exemple, le Conseil consultatif sur les logiciels de loisirs (RSAC) adapta à l'Internet son système d'évaluation des jeux informatiques. Chaque étiquette RSACi (le «i» signifiant «Internet») contient

quatre nombres qui indiquent respectivement les degrés de violence, de nudité, de sexe et de vulgarité. Une autre organisation, *SafeSurf*, a défini un barème à neuf critères.

Toutefois, les étiquettes permettraient de traiter d'autres problèmes que l'indécence. Un barème de confidentialité, par exemple, décrirait les pratiques des sites, indiquant quelles sont les informations confidentielles collectées par ces sites et quel est l'usage ultérieur de ces informations (fichiers commerciaux, revente, etc.). D'une manière analogue, un barème de propriété intellectuelle décrirait les conditions sous lesquelles on peut regarder ou reproduire un document (voir *Les systèmes sécurisés* par Mark Stefik, page 12). Divers services d'indexation du web pourraient créer des étiquettes indiquant le sujet des documents offerts par les sites ou la fiabilité des informations qu'ils diffusent.

Ces étiquettes pourraient même protéger les ordinateurs contre les virus. Aujourd'hui, les utilisateurs téléchargent couramment des modules de logiciels informatiques, voire des logiciels complets à partir de sites Internet. Les utilisateurs admettent généralement que les logiciels ainsi récupérés n'introduisent pas de virus ; ils amélioreraient la sécurité de leur ordinateur si le téléchargement était précédé d'une lecture d'étiquettes qui garantiraient que le logiciel ne ren-

1. LE SYSTÈME DE FILTRAGE du réseau mondial permet aux utilisateurs de décider quels types de documents ils veulent recevoir. Ils précisent leurs exigences sur le contenu et sur la sécurité (a) ; le logiciel de traitement d'étiquettes (b) détermine alors s'il faut ou non interdire l'accès à certaines pages (précédées d'un panneau STOP). Ces étiquettes peuvent être attachées aux documents par l'auteur du site Web (c) ou stockées dans un catalogue (d) par un organisme d'évaluation.



ferme pas le virus : ces étiquettes indiqueraient les contrôles antivirus effectués sur le logiciel ou le degré de fiabilité du logiciel.

Dans la vie quotidienne, l'information relative à un objet est soit attachée à l'objet, soit regroupée dans un catalogue. Chez un concessionnaire automobile, par exemple, le client lit les caractéristiques et les prix sur des panneaux posés sur les nouveaux modèles, mais il peut également consulter des descriptions de ces modèles dans des revues spécialisées. Il en est de même pour les étiquettes PICS. Un fournisseur d'informations qui propose une description de ses propres productions peut soit placer ses étiquettes dans des documents à part, soit les adjoindre aux documents qui circulent sur le Web. Une tierce personne peut aussi décrire ces documents. Par exemple, le Centre Simon Wiesenthal, qui traque les activités des groupes néonazis, pourrait publier des étiquettes PICS qui signaleraient les pages du Web où figure de la propagande néonazie. Ces étiquettes

seraient stockées sur un catalogue. En abonnant leurs navigateurs à ce catalogue, les internautes éviteraient de visiter des sites en question.

Un logiciel peut être réglé non seulement pour faire apparaître les étiquettes, mais aussi pour les modifier. Plusieurs logiciels, dont *CyberPatrol* et *Microsoft Internet Explorer*, utilisent déjà le standard PICS pour contrôler l'accès aux sites. Un utilisateur qui s'abonne au catalogue présenté par RSACi peut régler les niveaux maximaux de tolérance à l'égard du langage, de la nudité, du sexe et de la violence. Un utilisateur qui s'abonne à un barème de contrôle antivirus peut choisir les contrôles antivirus appropriés.

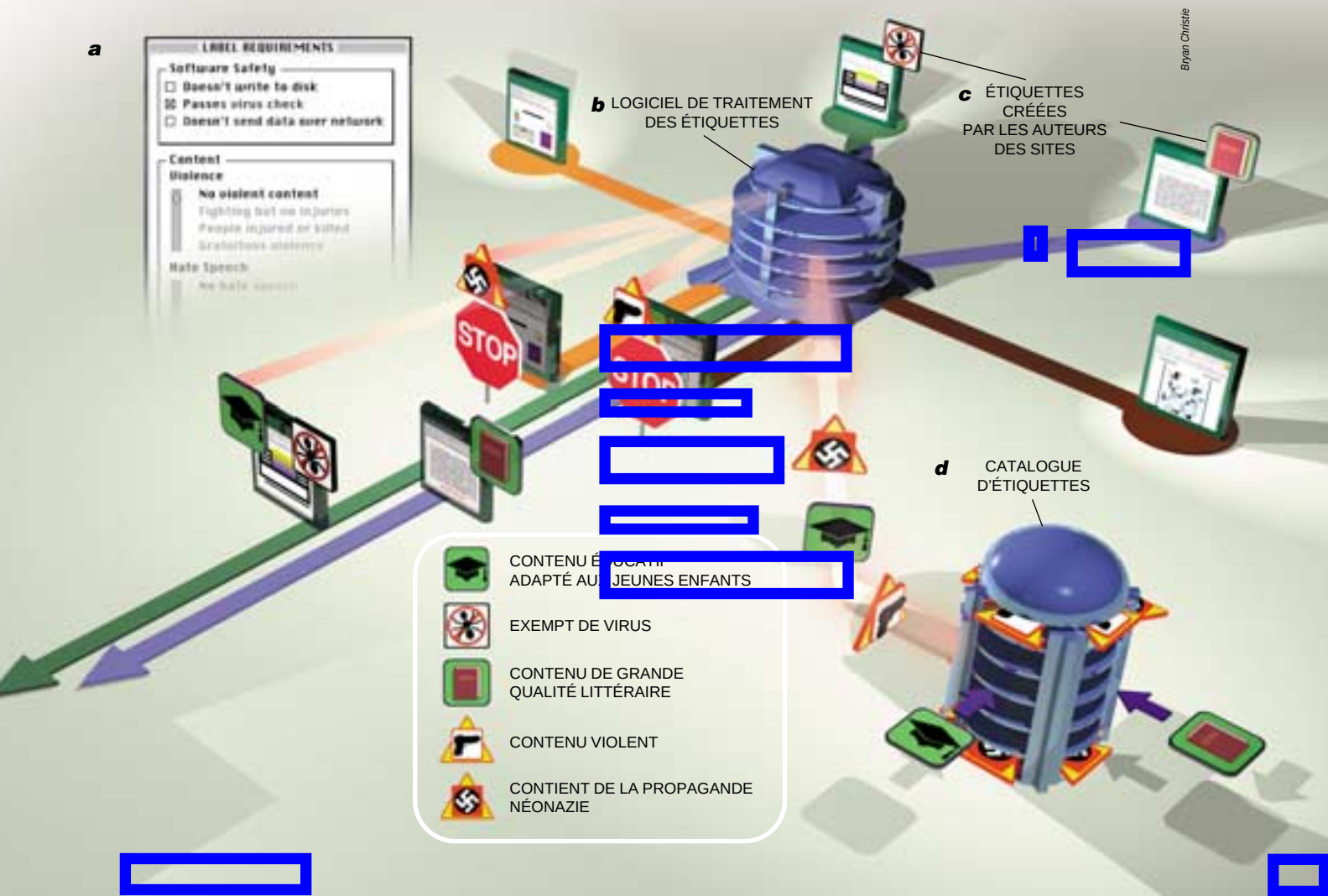
Si l'utilisation d'étiquettes exclut les documents indésirables, il facilite également la recherche de documents. Sur la foi d'étiquettes idoines, un moteur de recherche peut recommander des œuvres de grande qualité littéraire, et les serveurs Web peuvent trier, pour ceux qui le désirent, les services qui ne recueillent pas d'informations personnelles.

Établir la confiance

Comment savoir si les étiquettes sont fiables ? Le créateur d'un virus peut facilement falsifier une étiquette trompeuse affirmant qu'un logiciel n'est pas infecté. La question de la fiabilité des logiciels n'est que reportée sur la fiabilité des étiquettes. On résoudrait ce problème en utilisant des techniques cryptographiques, qui déterminent si un document a été modifié depuis la création de son étiquette et qui garantissent que l'étiquette provient réellement de l'auteur de l'œuvre numérique.

Toutefois, cette solution déplace à nouveau le problème, car il s'agit alors de savoir non si l'on peut se fier à une étiquette, mais si l'on peut se fier à son créateur. On devra alors décider de se fier aux étiquettes de quelqu'un qu'on connaît personnellement ou d'une société qui a pignon sur rue, ou bien on s'en remettra à une entreprise de vérification.

Bien sûr, certaines étiquettes sont subjectives. Un usager pourra se méfier de certaines étiquettes, parce



Auteur de l'étiquette

URL de la page
étiquetée

labels

by "patrick@GoodMouseClicking.com"

for "http://www.w3.org/PICS"

generic

Cette étiquette

expire le 4 avril 1997

Ce terme signifie
que l'étiquette s'applique
à l'ensemble des fichiers
accessibles à l'adresse
<http://www.w3.org/PICS>

exp "1997.04.04T08:15:50"

ratings (q 2 v 3)

L'auteur de l'étiquette
a attribué une qualité
littéraire de 2 et un degré
de violence de 3 au site.

2. LA LECTURE d'une étiquette PICS est effectuée automatiquement par les logiciels de traitement d'étiquettes. L'étiquette présentée ici note la qualité littéraire et le degré de violence du site Web <http://www.w3.org/PICS>.

qu'il n'approuve pas les critères qu'elles retiennent. Ainsi, des systèmes tels que *GroupLens* et *Firefly* recommandent des choix de livres, d'articles, de vidéos ou d'œuvres musicales fondés sur les appréciations de personnes partageant des goûts semblables : après que les utilisateurs ont évalué des documents traitant de sujets qui leur sont familiers, le logiciel compare leurs appréciations à celles d'autres utilisateurs et il privilégie ultérieurement les documents approuvés par les personnes qui partagent les appréciations que les utilisateurs portent sur d'autres documents. Les utilisateurs qui ont les mêmes goûts ou opinions n'ont pas à se connaître ; chacun peut participer anonymement à l'étiquetage, préservant ainsi la confidentialité de ses modes d'évaluation et de leur résultat.

L'emploi des étiquettes pose plusieurs problèmes politiques et sociaux. Tout d'abord, qui décide des procédures d'étiquetage et des étiquettes que l'on doit renfermer ? En théorie, n'importe qui pourrait étiqueter un site et définir ses propres critères de filtrage. En pratique, l'attribution des étiquettes ou le choix des critères pourraient être imposés par les autorités. Cela s'est déjà produit pour la télévision : sous la pression du Conseil supérieur de l'audiovisuel, les chaînes ont entrepris d'évaluer l'adéquation de leurs émissions à l'âge des téléspectateurs.

L'auto-étiquetage obligatoire ne débouche pas sur la censure, tant que les individus peuvent choisir eux-mêmes quelles étiquettes ignorer. Malheureusement, les gens n'ont pas toujours ce pouvoir. Si un contrôle individuel amélioré est un argument contre

un contrôle central, il n'empêche pas sa mise en place. À Singapour et en Chine, par exemple, on expérimente des «garde-fous», matérialisés par des programmes et par des cartes électroniques qui interdisent l'accès à certains forums de discussions et sites du réseau.

Toutefois, même en l'absence d'une censure centrale, la mise en place d'un barème consensuel, quel qu'il soit, encouragera les utilisateurs à faire des choix limités qui ne refléteront pas les valeurs auxquelles ils croient. Aujourd'hui, nombre de parents qui n'approuvent pas obligatoirement les critères de classement des films, interdisent néanmoins à leurs enfants de voir des films «interdits aux moins de 12 ans» ou «interdits aux moins de 16 ans» : ils ne prennent pas le temps d'évaluer eux-mêmes ces films.

Les organismes d'étiquetage doivent choisir leur vocabulaire avec discernement, de manière à correspondre aux critères de la plupart. Même ainsi, un vocabulaire unique ne peut pas répondre aux besoins de tous. Les étiquettes mentionnant uniquement le degré de pornographie des sites n'aident pas les utilisateurs préoccupés par le degré de violence verbale. De plus, aucun barème ne peut remplacer une évaluation précise : les comptes rendus de films publiés par les journaux sont bien plus éclairants que les codes parfois utilisés pour classer les œuvres cinématographiques.

De surcroît, les étiquetages, quels que soient les soins apportés à leur conception et à leur application, risquent d'étouffer les informations non commerciales. Un étiquetage bien fait nécessite du temps et de l'énergie : nombre

de sites d'intérêt limité ne seront probablement jamais étiquetés. Par souci de sécurité, certaines personnes bloqueront l'accès aux documents dépourvus d'étiquette ou dont les étiquettes ne leur semblent pas fiables. Pour elles, Internet fonctionnera davantage comme la télévision, offrant uniquement accès aux documents suffisamment porteurs d'audience pour qu'il soit financièrement rentable de les étiqueter.

Cet problème inévitable n'est pas du à l'étiquetage : quel que soit le média utilisé, les gens tendent à éviter l'inconnu, or qu'il y a des risques, et il est bien plus facile d'obtenir des informations sur des documents destinés à une grande audience que sur des sujets confidentiels.

Si le réseau Internet supprime les barrières techniques de communication, il n'élimine pas pour autant les coûts sociaux de cette communication. Les étiquettes peuvent réduire ces coûts, en aidant les utilisateurs à décider de la confiance qu'ils accordent aux logiciels ou aux sites du réseau. Aux utilisateurs de faire que les systèmes d'étiquetage guident leur exploration sans les empêcher de voyager.

Paul DESNICK, président du Consortium World Wide Web, est informaticien au laboratoire de la Société AT&T.

Jonathan WEINBERG, *Rating the Net*, in *Hastings Communications and Entertainment Law Journal*, vol. 19, mars 1997. Disponible sur le Web, à l'adresse : <http://www.msen.com/~weinberg/rating.htm>

Les spécifications du PICS sont consultables sur <http://www.w3.org/PICS>

Le multilinguisme

BRUNO COUET

La multitude de langues parlées à travers le monde résistera-t-elle à l'impérialisme de l'anglais sur l'Internet ?

Ces dernières années, la culture américaine a accru son influence planétaire grâce au commerce international et aux productions cinématographiques. Alors que l'Internet atteint des endroits de plus en plus reculés, la question se pose : renforcera-t-il cette influence au point que l'anglais deviendra la langue dominante dans les échanges ? Ou l'univers de la communication s'enrichira-t-il d'une multitude de langues ? Certains observateurs pensent que les langues locales ne survivront pas sur l'Internet et que l'anglais dominera.

Une telle domination aurait des inconvénients. Comme la plupart des utilisateurs de l'Internet ne sont pas de langue anglaise, leur maîtrise de l'anglais est souvent limitée. Pour les discussions internationales, la langue maternelle s'impose ; mais si l'Internet ne permet pas des conversations multilingues, il ne sera pas le catalyseur attendu des communications internationales. Les erreurs et les malentendus deviendront fréquents, et nombre d'utilisateurs seront privés des fabuleuses potentialités des communications internationales.

Plusieurs forces détermineront la diversité linguistique du réseau. Aujourd'hui, 60 pour cent des ordinateurs reliés à l'Internet sont situés aux États-Unis. Hors d'Amérique du Nord, en Europe, en Asie, en Australie, en Afrique, en Amérique latine, en Océanie, la plupart des branchements sur l'Internet sont récents et encore limités. Cependant, le nombre de connexions augmente partout. Avec la chute constante du coût d'installation des réseaux de communication, la répartition des utilisateurs approchera bientôt celle des ordinateurs dans le monde.

Grâce à son faible coût et à sa facilité d'emploi, l'Internet permet à certains écrivains – particulièrement ceux qui utilisent l'alphabet latin – de publier leurs œuvres ou d'échanger des messages dans leur propre langue. Certains défenseurs des langues vernaculaires utilisent déjà ce réseau à leur avantage. Par exemple, bien que les Canadiens francophones ne représentent que cinq pour cent de la population, ils ont créé un site Web où toutes les pages publiées en français sur le réseau proviennent du Québec. L'extension mondiale de l'Internet favorise également une langue qui peut être, du moins superficiellement, comprise par le plus grand nombre. Ainsi, je crois que l'Internet véhiculera de nombreuses langues pour les communications locales, tandis que

l'anglais servira aux conversations internationales simples.

Les difficultés techniques de la communication dans la plupart des langues de la planète ne sont pas résolues. Les premières machines et les premiers logiciels furent conçus pour traiter les textes en anglais. Les difficultés subsistent même avec les caractères latins standards. Au début d'Arpanet – le réseau qui précéda Internet – on ne pouvait transmettre que des messages électroniques codés en ASCII (l'acronyme de cette norme américaine de codage des caractères) à sept bits ; dans ce code, chaque caractère est défini par une chaîne de sept chiffres binaires, ce qui permet le codage de 2^7 , soit 128 caractères. Aujourd'hui, le nouveau protocole de transport de courrier (ESMTP) permet de traiter les huit bits nécessaires au codage en ISO-latin, l'une des normes proposées par l'Organisation internationale de la standardisation (ISO) : ce standard autorisant 256 caractères,

signes diacritiques (par exemple, les accents sur les lettres) de toutes les langues d'Europe occidentale. Toutefois, comme de nombreux ordinateurs reliés par l'Internet ont des logiciels obsolètes, le huitième bit disparaît parfois, ce qui rend le message quasi incompréhensible. En 1995, sur les 12 000 utilisateurs qui recevaient les



1. SUR CE SITE, qui utilise Unicode, une norme de codage des caractères de toutes les langues du monde, l'utilisateur peut choisir la langue.



Accentsoft

2. LA SOCIÉTÉ ACCENTSOFT propose des outils multilingues, tel le navigateur Web Mosaic Multilingue.

nouvelles quotidiennes en français par l'Internet 8 500 avaient réclamé une version codée en ASCII sept bits, plutôt que la version estropiée en ISO-latin.

Bien que certains logiciels récents puissent afficher leurs textes dans de nombreux alphabets différents, la plupart sont bilingues et traitent seulement une langue locale, par exemple le japonais plus l'anglais. Les obstacles techniques à l'affichage d'autres alphabets sont-ils temporaires? Unicode (ISO 10646), un codage de la plupart des caractères du monde, permet de coder presque n'importe quelle langue (mais sans résoudre la question de son affichage). Cependant un long chemin reste à parcourir avant que l'Internet ne devienne réellement multilingue et que l'on puisse, par exemple, insérer une citation en grec à l'intérieur d'un texte russe. Des logiciels dotés de ces fonctionnalités apparaissent, mais, dans leur concurrence, les grands constructeurs de logiciels produisent sans cesse de nouvelles versions, ce qui ne laisse guère de chances de survie aux petites entreprises qui conçoivent des produits multilingues.

Puisque les interprètes aident à surmonter les barrières du langage, ne pourrions-nous pas nous laisser traduire les documents échangés sur l'Internet? Le volume et la diversité des échanges limite leur rôle. Seuls les programmes de traduction assistée par ordinateur nous rapprocheront d'un monde – peut-être utopique – où chaque participant d'une conférence virtuelle des Nations unies utiliserait sa langue maternelle, qui serait

alors traduite simultanément dans toutes les autres langues.

Malgré 50 ans de recherches, la traduction automatique reste encore très insatisfaisante. Aujourd'hui, les systèmes de traduction ne sont utilisés qu'au Japon, au Canada et en Europe. Généralement, les interprètes électroniques sont uniquement bilingues, et ils doivent être extrêmement spécialisés pour livrer des traductions suffisamment bonnes pour être affinées par un être humain.

Le premier système public fut Sys-tran, qui traduisait 14 paires de langues dès 1983, sur le réseau Minitel. Utilisé par la Compagnie aérienne Air France, Sys-tran traduit aujourd'hui des centaines de milliers de pages par an. Le système Météo, une autre grande réussite, traduit les bulletins météorologiques canadiens de l'anglais en français et inversement. Il traite quotidiennement 80 000 mots (environ 400 bulletins), avec seulement trois à cinq interventions humaines pour 100 mots.

Plusieurs groupes de recherche élaborent aujourd'hui une procédure à deux étapes dont bénéficiera la traduction multilingue. Dans cette procédure on analyse d'abord entièrement le texte : on le décompose en ses éléments constitutifs (titre, paragraphe, phrase), et les ambiguïtés potentielles sont levées par un dialogue avec l'auteur. Le texte passe alors par une forme intermédiaire abstraite, qui sert de base pour les traductions dans différentes langues. La dépense occasionnée est justifiée lorsque le texte doit être traduit en plus de dix langues. L'Université des Nations Unies, à Tokyo, a récemment proposé un projet qui devrait, en l'espace de dix ans, concrétiser ces recherches.

Toutefois, le réseau Internet ne deviendra véritablement multilingue que s'il existe une concertation internationale. Lui donnerons-nous une priorité suffisante? La réponse à cette question est encore floue. Il nous est difficile de nous laisser dériver vers l'anglais en tant qu'unique langue commune.

Bruno OUDET est professeur à l'Université Joseph-Fourier de Grenoble et chercheur au Laboratoire Leibniz de l'IMAG. Il est actuellement président de la Société française de l'Internet.

Les interfaces de recherche

MARTIN HEARST

Le rapide développement du réseau mondial gêne sa rationalisation et son organisation. De nouvelles interfaces faciliteraient son emploi.

Comment éviter de se perdre dans l'immensité du réseau mondial? Nombre de sites permettent de retrouver facilement certaines informations courantes et sommaires, tels des numéros de téléphone ou les cours de la Bourse, mais le réseau Internet est remarquable parce qu'il ne nous cantonne pas à un quotidien prosaïque et qu'il fait venir sur nos bureaux des informations extraordinairement variées. Pourtant, par manque d'organisation cohérente, le cyberspace devient de plus en plus confus. Les outils qui servent aujourd'hui à localiser un document dans l'Oregon, un catalogue en Grande-Bretagne ou une image au Japon sont souvent d'une lenteur désespérante.

Quelques algorithmes classent les résultats des recherches d'après leur pertinence, mais le remède à la lenteur du réseau résidera plus probablement dans l'emploi de nouveaux programmes nommés interfaces utilisateur. Aujourd'hui des logiciels d'analyse de textes et de manipulation de données hiérarchisées facilitent la recherche sur le réseau Internet ou dans de grandes bases de données, car la plupart des sites informatiques sont organisés en «pages», une structure simple et familière, mais inutilement restrictive. Dans l'avenir, cette présentation sera remplacée par des structures qui montreront les informations de plusieurs points de vue simultanés. Imaginons qu'Alice, dans la Creuse, se connecte au réseau afin de savoir quels types de bulbes comestibles, tels l'ail ou l'oignon, elle peut planter dans son jardin. Les réponses à sa question se trouvent certainement sur le réseau, mais où?

Alice dispose aujourd'hui de plusieurs techniques pour s'y retrouver, mais aucune n'est parfaitement satisfaisante. Elle peut d'abord demander à des amis s'ils connaissent des sites inté-

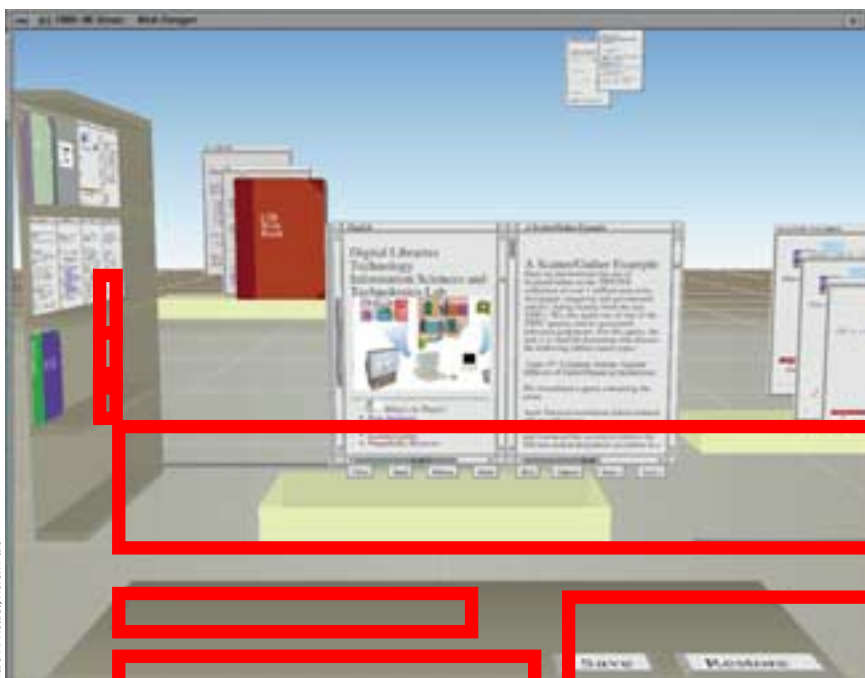
ressants. Elle peut aussi feuilleter des index du réseau, qui sont aujourd'hui de deux types : soit des listes construites manuellement, qui classent les sites par type de contenu, soit des moteurs de recherche qui repèrent rapidement des mots clés dans les index du réseau.

Grâce à leurs employés qui répertorient quotidiennement des centaines de documents, des sites, tels *Yahoo* et *Nomade*, proposent aux utilisateurs une table des matières. Pour y rechercher l'information, on choisit dans un menu (voir la figure 1) la catégorie qui semble la plus proche de celle que l'on cherche et l'on reçoit un sous-menu plus spécialisé ou une liste de sites dont le personnel de la société pense qu'ils appartiennent à cette catégorie. Tou-

tefois l'emploi de ces tables des matières n'est pas très simple, car les catégories ne sont pas toujours mutuellement exclusives : Alice doit-elle choisir la rubrique «Loisirs», ou bien la rubrique «Écologie», par exemple? Quel que soit son choix, le menu disparaît de l'écran, de sorte qu'en cas d'échec elle doit refaire toute la recherche, et répondre à toutes les questions posées par l'interface de recherche. Si l'un de ses choix n'aboutit pas (si la rubrique «Écologie» ne contient pas l'information cherchée, par exemple), elle doit repartir à zéro et en essayer une autre. Si l'information désirée est enfouie dans les profondeurs de la hiérarchie ou n'existe pas, la procédure peut être fastidieuse, voire exaspérante.



1. LE SYSTÈME de mise en page utilisé sur la plupart des sites du réseau impose des contraintes superflues aux services, tels *Yahoo* ou *Nomade*, qui tentent de structurer le contenu du réseau, afin de faciliter la recherche d'informations. Un utilisateur qui désire connaître les type de bulbes comestibles (ail, oignon, etc.) qu'il peut planter en automne, par exemple, peut choisir une catégorie. Plus il précise sa demande, plus il lui est difficile de se rappeler quelles catégories potentiellement utiles il n'a pas encore explorées.



Marti A. Hearst, Xerox Parc

2. DES PROGRAMMES de recherche facilitent l'exploration du réseau en créant des livres virtuels qui contiennent les pages trouvées, ainsi que les liens vers des sites. Ces livres qui stockent les résultats des recherches sont placés sur des étagères virtuelles, où l'on peut les reprendre ultérieurement. Ils peuvent également servir d'aide-mémoire pour la recherche de nouvelles informations.

La lenteur de la pensée

Durant la dernière décennie, les recherches sur la visualisation de l'information ont engendré plusieurs techniques efficaces pour l'affichage d'ensembles de données abstraites sous une forme plus propice à l'exploration. L'une des stratégies consiste à transformer le travail demandé à l'utilisateur, en remplaçant les processus lents et intellectuellement exigeants – telle la lecture – par des processus perceptifs plus rapides, comme la reconnaissance de formes. Ainsi on compare plus facilement les barres d'un histogramme que les nombres d'une liste. La couleur, également, facilite la détection des mots ou objets dans un océan de mots ou d'objets.

Une autre stratégie consiste à exploiter l'illusion de profondeur que peuvent donner les écrans : quand l'affichage donne une image bidimensionnelle d'un monde à trois dimensions, la perspective, le recouvrement et les ombrages fournissent des indices perceptifs qui clarifient les relations entre des documents qui formeraient une mosaïque indéchiffrable dans une page à deux dimensions ; on peut mettre au premier plan les informations les

plus intéressantes et rejeter à l'arrière-plan ou à la périphérie de l'écran les informations secondaires ou celles qui ont conduit aux informations cherchées. Ainsi, l'utilisateur garde une vision structurée de sa recherche.

Un tel environnement facilite l'exploration. Les utilisateurs peuvent dénicher les résultats partiels qu'ils utilisent ultérieurement, mieux formuler leurs demandes, reprendre des voies qu'ils avaient jugées inintéressantes ou envisager leurs demandes sous un angle nouveau. Aujourd'hui Alice peut avoir cette démarche si elle prend des notes à mesure qu'elle utilise Yahoo, mais un prototype conçu par mes collègues du Centre de recherches Xerox vise à accroître l'efficacité de ces activités intelligentes.

Nommée *Information Visualizer*, ce programme dessine un arbre tridimensionnel (voir la figure 3) qui relie chaque catégorie à toutes ses sous-catégories. Si Alice cherche l'arbre Yahoo pour «jardins», les six zones de Yahoo dont «jardin» ou «jardinage» sont une sous-catégorie s'affichent simultanément. En faisant tourner l'arbre, Alice peut amener chacune de ces catégories au premier plan pour découvrir où elle conduit. Lorsqu'un chemin aboutit à

une impasse, il suffit de cliquer une fois pour retrouver les voies non explorées.

Lorsque Alice trouve une information intéressante, elle peut utiliser le programme pour la stocker dans un livre virtuel, avec les mots clés qui ont été utilisés ; puis elle peut placer ce livre sur une étagère virtuelle, où il est visible et nettement étiqueté. Le week-end suivant, par exemple, elle peut reprendre sa recherche à l'endroit où elle l'a laissée : il lui suffit d'ouvrir le livre et de relancer la recherche à partir d'une de ses pages.

Notre interface ne pourrait servir à structurer tout le réseau : les sites nouveaux apparaissant bien trop rapidement pour être indexés à la main, la proportion de sites répertoriés par Yahoo (ou par tout autre service) diminue de jour en jour. En outre, certains sites, tel celui des quotidiens, contiennent des articles sur tant de sujets qu'ils ne sont souvent rangés que dans quelques-unes des catégories possibles.

Les moteurs de recherche tels que *Excite* et *Alta Vista* sont bien plus généralistes, mais c'est là leur faiblesse. Si Alice fournissait à *Excite* la chaîne de mots clés «ail, oignon, automne, jardin croissant», elle récupérerait 583 431 pages, ce qui (au rythme de deux minutes par page) lui demanderait plus de deux années ininterrompues de feuilletage. Plus généralement, toute recherche exhaustive procure inévitablement des listes encombrées d'informations superflues, tandis que les recherches plus ciblées risquent de passer à côté de nombreuses pages intéressantes.

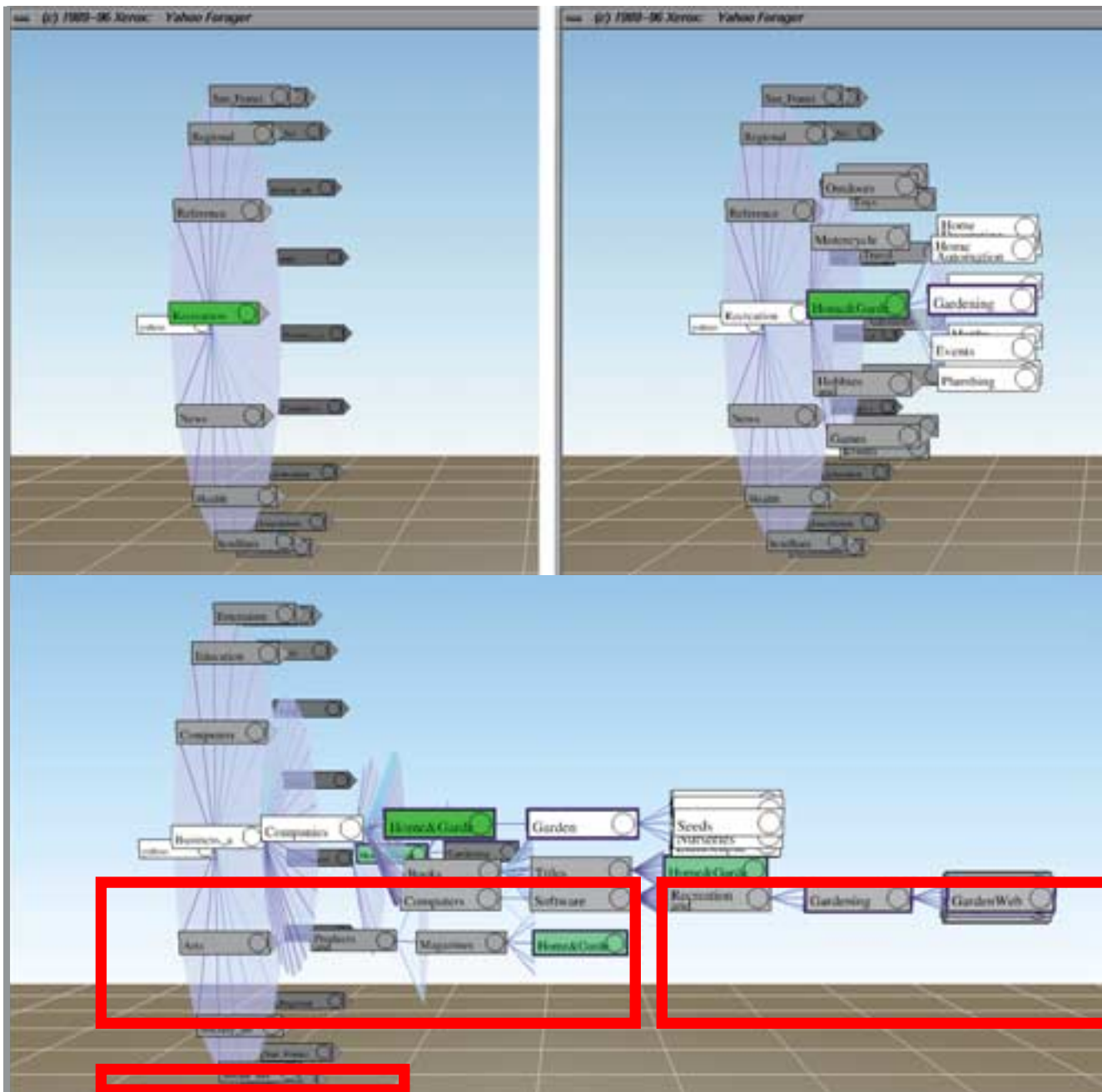
Structurer les résultats de recherche

La confusion des formulaires d'entrée de la plupart des services de recherche aggrave le problème, parce qu'elle incite les utilisateurs à faire des demandes lapidaires et nécessairement vagues. On devrait encourager l'emploi d'opérateurs logiques tels que AND, OR et NOT pour spécifier les mots qui doivent (ou ne doivent pas) figurer sur les pages affichées. Cependant cette notation booléenne intimide ou déroute de nombreux utilisateurs, et même les spécialistes n'obtiennent que des réponses dont la qualité dépend des termes utilisés dans leur demande. Une meilleure solution consiste à

construire des interfaces utilisateur qui ordonnent les immenses stocks d'informations produites par les recherches sur le réseau. Certains algorithmes regroupent automatiquement les pages en catégories, par exemple, mais ils ne savent pas encore classer un même texte dans plusieurs catégories. Si l'on peut souvent attribuer une place unique

aux objets réels dans les taxonomies (un oignon est un type de plante potagère), aucune page du réseau ne traitera probablement que des oignons. Généralement, ces pages contiennent des noms de distributeurs du produit, des recettes de soupe à l'oignon ou présentent des débats opposant les légumes importés aux légumes indigènes, de sorte que la

même information peut se trouver à la fois dans deux catégories : par exemple, une recette de soupe à l'oignon peut se trouver référencée à «oignon» ou à «soupe». La seule façon d'éviter cette double catégorisation consiste à créer une catégorie plus spécifique (par exemple, «distributeurs d'oignons»), mais il serait plus approprié de décrire



3. POUR CLARIFIER des hiérarchies complexes, telle l'arborescence donnée par le service Yahoo, certaines interfaces de recherche proposent des affichages animés tridimensionnels. Les étiquettes des catégories, disposées horizontalement, forment une structure arborescente (en haut à gauche). Une seule étiquette est active (celle du premier plan), mais on fait venir des étiquettes d'arrière-plan en cliquant dessus : le sous-arbre qui la contient tourne, et montre

simultanément toutes les sous-catégories de la catégorie activée. La recherche d'un nom de catégorie (par exemple, «jardin») encadre en violet toutes les étiquettes correspondantes de la hiérarchie (en bas à droite). Contrairement aux pages données par Yahoo, cette interface tridimensionnelle permet à l'utilisateur de passer immédiatement à un niveau quelconque de la hiérarchie et de faire des recherches simultanées dans plusieurs catégories.

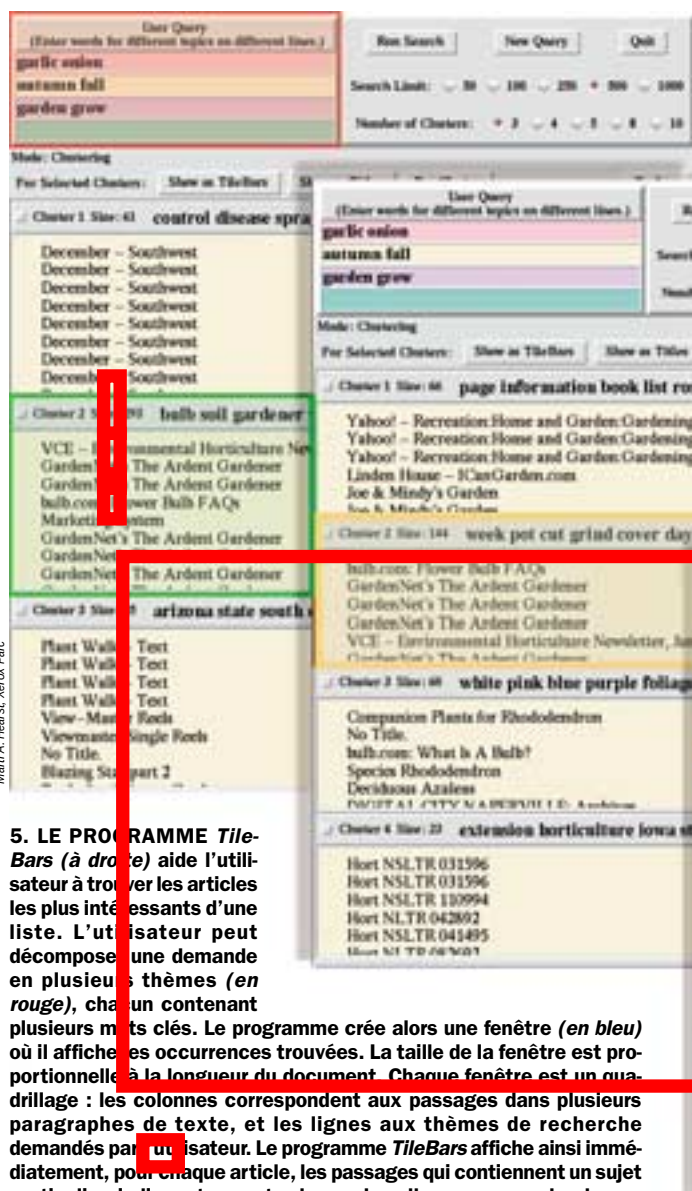
les documents par la totalité des catégories qui leur correspondent, ainsi que par un autre ensemble d'attributs (par exemple, l'origine, la date, le genre et l'auteur). Les informaticiens de la bibliothèque de l'Université Stanford élaborent actuellement une interface nommée *SenseMaker*, fondée sur ce principe.

Au Centre de recherches Xerox, nous avons mis au point une autre procédure pour grouper les pages fournies par un moteur de recherche. Cette procédure nommée *Scatter/Gather* construit une table des matières qui

se modifie à mesure que l'utilisateur comprend mieux la nature des documents disponibles et découvre ceux qui sont les plus intéressants.

Imaginons qu'effectuant une recherche à l'aide du programme *Excite*, Alice reçoive les 500 premières pages proposées par le réseau. Le système *Scatter/Gather* examine alors ces pages et les répartit en trois à cinq groupes selon leurs ressemblances (voir la figure 4). Alice peut alors examiner ces groupes et choisir ceux qui lui semblent plus intéressants.

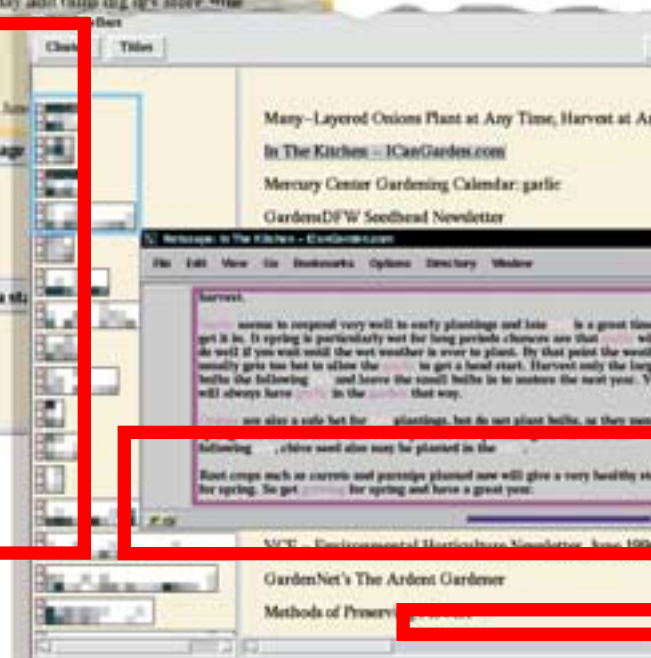
Bien que le comportement des utilisateurs soit variable, les expériences indiquent que les arborescences facilitent l'accès aux documents intéressants. Si Alice juge que le groupe des 293 textes resumés par «bulbes», «sol» et «jardinier» est prometteur, par exemple, elle peut utiliser *Scatter/Gather* pour le parcourir et le diviser en sous-groupes plus petits. Après quelques subdivisions, elle ramène son ensemble de 500 pages, pour la plupart sans intérêt, à un groupe de quelques dizaines de pages qui, elles, sont intéressantes.



4. L'INTERFACE *Scatter/Gather* groupe les pages de premier niveau identifiées par le moteur de recherche *Excite*, et il étiquette chaque groupe par des mots qui semblent caractéristiques (ces mots, puisés dans les documents réels, sont probablement différents de ceux que *Yahoo* aurait choisis).

L'examen des étiquettes permet à l'utilisateur de décider que, par exemple, le groupe 2 (en vert) semble plus intéressant. Pour avoir une idée plus claire de son contenu, l'utilisateur peut restructurer les 293 documents du groupe 2 en quatre sous-groupes (au milieu). Il peut alors choisir de n'examiner que les documents du deuxième sous-groupe (dans le cadre orange).

5. LE PROGRAMME *TileBars* (à droite) aide l'utilisateur à trouver les articles les plus intéressants d'une liste. L'utilisateur peut décomposer une demande en plusieurs thèmes (en rouge), chacun contenant plusieurs mots clés. Le programme crée alors une fenêtre (en bleu) où il affiche les occurrences trouvées. La taille de la fenêtre est proportionnelle à la longueur du document. Chaque fenêtre est un quadrillage : les colonnes correspondent aux passages dans plusieurs paragraphes de texte, et les lignes aux thèmes de recherche demandés par l'utilisateur. Le programme *TileBars* affiche ainsi immédiatement, pour chaque article, les passages qui contiennent un sujet particulier, indiquant en outre le nombre d'occurrences de chaque sujet (plus les carrés sont sombres, plus les occurrences sont nombreuses). Ici, la ligne supérieure de chaque rectangle indique le nombre d'occurrences des mots «ail» ou «oignon» dans le premier thème ; la ligne du milieu correspond au nombre d'occurrences du mot «autour», etc. Cette interface guide les recherches. Les deux articles supérieurs, où les trois sujets figurent dans plusieurs pas-



sages, seront probablement plus intéressants que le document inférieur, qui ne contient aucune mention des mots «ail» ou «oignon». En cliquant sur un carreau d'une fenêtre, on affiche une fenêtre (en mauve) où s'affiche le passage correspondant à l'intérieur du texte, avec les mots clés mis en relief par des couleurs appropriées.

Cartographie thématique

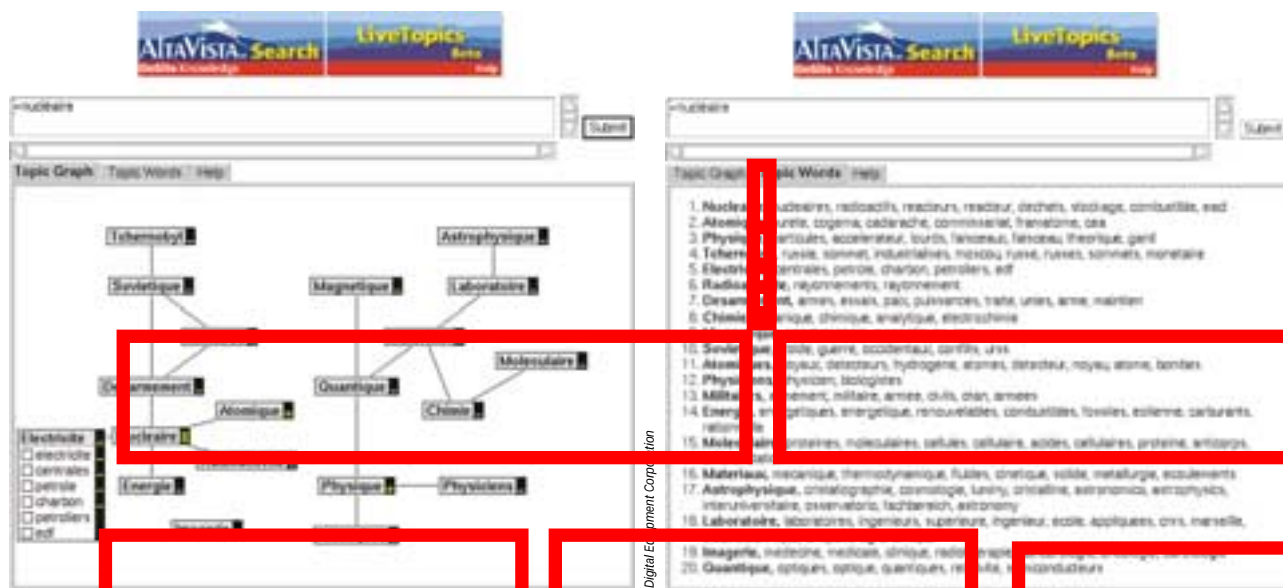
Dans une approche différente de celle des programmes qui aident à visualiser la classification *a priori* des thèmes d'une recherche, tels ceux décrits dans cet article, nous avons conçu un logiciel, nommé *LiveTopics*, qui propose à l'utilisateur submergé par l'avalanche de documents renvoyés par sa requête, une cartographie thématique et dynamique des documents. À l'aide de cette carte, l'utilisateur appréhende rapidement le contenu des documents. En incluant ou en excluant certains des thèmes de la carte, il affine sa recherche.

Ce logiciel est aujourd'hui proposé sur le moteur de recherche *AltaVista* de la Société *Digital Equipment*. Lorsque l'utilisateur reçoit plus d'une vingtaine de réponses, il peut demander à visualiser une synthèse thématique de l'ensemble des réponses. Par exemple, la recherche du mot «nucléaire» renvoie des thèmes variés où l'on

retrouve ce qui concerne la physique, l'énergie, l'électricité et l'astrophysique (voir la figure). L'utilisateur passe ensuite en revue chacun des thèmes et les mots qui s'y rapportent. Il peut alors modifier sa requête d'un simple clic de la souris, en incluant ou en excluant certains mots, et lancer une nouvelle recherche qui pourra de nouveau donner lieu à une analyse thématique.

Fondé sur une analyse statistique du texte intégral des documents, *LiveTopics* n'utilise aucune analyse linguistique ni sémantique, ce qui rend possible l'analyse de documents indépendamment de leur langue, pourvu que cette langue s'écrive avec des caractères latins. Une évolution vers des caractères d'autres langues est à l'étude, ainsi qu'une version de la technique adaptée au monde des réseaux d'entreprises.

Francois BOURDONCLE, École des mines de Paris



Dans le moteur de recherche *AltaVista* (<http://www.altavista.digital.com/>) la demande «nucléaire» renvoie 11 877 documents. Lorsque on lance une recherche sur *Ve Topics*, une carte des thèmes apparaît. À gauche, on trouve le thème *Nucléaire* relié à *Énergie*, *Électricité*, *Radiactivité*, mais aussi le thème du désarmement, lié à *Soviétique*, *Chem nobyl* et

Militaires. À droite de la carte apparaît la recherche : **Quantique, Magnétique, Physique, Chimie, etc.** Notez le thème **Imagerie** qui est isolé à part. On trouve la liste des mots associés à la recherche. On peut les exclure ou les inclure. Paraissent plutôt les thèmes liés à la recherche : **Quantique, Magnétique, Physique, Chimie, etc.** Notez le thème **Imagerie** qui est isolé à part. Sur l'écran de droite, on trouve la liste des mots associés à la recherche de la demande «nucléaire». On peut les exclure ou les inclure pour une nouvelle recherche.

Le groupement de documents n'est pas une panacée, car il n'explique pas comment les documents sont trouvés. En revanche, quand le formulaire d'entrée encourage les utilisateurs à décomposer leurs demandes en plusieurs groupes de mots clés apparentés, une interface graphique peut indiquer les voies de recherche obtenues et les endroits où elles sont apparues dans les documents trouvés. Si tous les sujets se retrouvent au même endroit, le document a plus de chances d'être pertinent, et le programme lui accorde une priorité supérieure. Alice peut n'avoir aucune idée précise des sujets qui doivent apparaître dans le document ou du degré de proximité qui doit les

unir, mais elle a des chances de reconnaître ce qu'elle désire lorsqu'elle le voit et peut alors affiner sa demande. Cette technique que j'ai nommée *TileBars*, peut guider les utilisateurs lorsqu'ils choisissent les documents qu'ils souhaitent examiner et les conduit plus rapidement aux endroits les plus pertinents.

L'étude de ces nouvelles interfaces utilisateur et techniques d'analyse de texte commence seulement. D'autres techniques combinent méthodes statistiques et empirisme pour résumer automatiquement des documents et les insérer dans un ensemble de catégories déjà existant. Elles proposent des synonymes pour des mots clés et répondent à des questions simples.

Martin HEARST est informaticien au Centre de recherche Xerox, à Palo Alto.

Ramalakrishnan, O., Jan O. PEDERSEN, Marti A. HEARSAY et Jock D. MACKINLAY et al., *Rich Interaction in the Digital Library*, in *Communications of the ACM*, vol. 38, n° 4, pp. 27-39, avril 1995.

Stuart K. CARD, George G. ROBERTSON
et William YORK, *The WebBook and the
Web Forager : An Information Workspace
for the World-Wide Web*, in *Proceedings
of the ACM/SIGHI Conference on Human
Factors in Computing Systems*, Vancou-
ver, avril 1996. Présent sur le réseau à
l'adresse : [http://www.acm.org/sigs/
sigchi/ch196/proceedings/papers/
Card/skc1txt.html](http://www.acm.org/sigs/sigchi/ch196/proceedings/papers/Card/skc1txt.html)

Les systèmes sécurisés

MARK STEFIK

La mise en place de dispositifs de protection numérique des droits d'auteur permettra aux auteurs de publier sereinement leurs œuvres sur l'Internet.

La banalisation de l'informatique a rapidement conduit les utilisateurs d'ordinateurs à penser que toutes les œuvres numériques – les programmes informatiques, les livres, les revues, la musique et la vidéo – pouvaient être copiées. Certaines figures de l'informatique ont même proclamé que la simplicité de la reproduction marquait la fin des droits d'auteur : « l'information veut être libre », disaient-ils. Autrement dit, il serait impossible de s'opposer à la diffusion de l'information, et tout ce qui peut s'exprimer sous forme de bits pourrait être impunément reproduit.

Cette idée est à la base de la création du réseau Internet : dans la nouvelle ère numérique où nous entrons, l'accès à l'information numérisée serait universel, et l'œuvre de n'importe quel auteur devrait être accessible à n'importe qui, n'importe où et n'importe quand.

Toutefois, par expérience, les utilisateurs du réseau savent que ce dernier ne contient pas de grandes œuvres ni d'informations capitales ; ce qu'on y trouve est souvent de faible valeur. La raison en est que les auteurs ou les éditeurs ne peuvent vivre en faisant cadeau de leur travail. Il suffit aujourd'hui de taper quelques touches d'un clavier pour copier un paragraphe, une revue, un livre, voire l'œuvre d'une vie. La duplication incontrôlée a tant modifié l'équilibre du contrat social entre les créateurs et les consommateurs d'œuvres numériques que la plupart des éditeurs et des auteurs refusent de laisser circuler le meilleur de leurs travaux sous forme numérique.

Toutefois, en coulisse, la technique se prépare à modifier cet équilibre. Au cours des toutes dernières années, plusieurs sociétés, telles *Folio*, *IBM*, *Intertrust*, *NetRights*, *Xerox* ou *Wave Systems*, ont mis au point des programmes et des



Jeff B.

machines qui permettent aux éditeurs de spécifier les modalités d'utilisation des œuvres numériques et de contrôler leur utilisation. Certains législateurs pensent que ce changement est si radical que les éditeurs auront un pouvoir excessif, et que les consommateurs et les bibliothécaires seront lésés.

Pourtant les besoins des consommateurs seront satisfaits, même avec les nouveaux systèmes : la technique introduisant davantage de sécurité, des œuvres de meilleure qualité pourront être proposées sur le réseau. Bien protégées, des auteurs célèbres auront peut-être envie de publier directement sur le réseau. L'accès à l'information ne sera peut-être pas gratuit, mais il pourrait être bien moins onéreux qu'aujourd'hui, car les coûts d'impression et de distribution sont considérablement réduits par la mise des informations sur le réseau ; les éditeurs pourraient répercuter ces économies aux consommateurs.

Les systèmes « sécurisés » sont la clé de cette mutation technique : ce sont des machines et des programmes dont le fonctionnement se conforme à des règles, nommées droits d'usage, qui définissent le coût d'accès aux œuvres numérisées et les modalités de leur utilisation. Un ordinateur sécurisé, par exemple, refuserait de faire des copies non autorisées ou de transmettre des documents sonores ou graphiques à un utilisateur qui n'aurait pas payé pour les acquérir.

Les types de systèmes sécurisés sont variés : des lecteurs sécurisés peuvent lire des livres numérisés, des magnétophones et des magnétoscopes sécurisés peuvent lire des enregistrements audio et vidéo, des imprimantes sécurisées peuvent faire des copies contenant des signes (des « filigranes ») qui indiquent le droit d'utilisation et de reproduction accordé, et des serveurs sécurisés peuvent se charger de vendre des œuvres numériques sur l'Internet. Bien que complexes, les techniques d'élaboration des systèmes sécurisés ont une fonction simple : elles permettent aux éditeurs de distribuer leurs produits – sous forme cryptée –, de sorte que ceux-ci ne soient affichés ou imprimés que par des machines sécurisées. Les premiers systèmes sécurisés équiperaient des imprimantes ou des lecteurs numériques de poche – avec un surcoût pour l'utilisateur, qui accéderait alors à des documents bien plus intéressants qu'aujourd'hui. Puis, comme toujours, l'avènement des nouvelles techniques entraînerait une baisse des prix. Naturellement les éditeurs pourront encore donner gratuitement accès à certaines œuvres : les serveurs sécurisés les transmettront alors sans imposer les protocoles spécifiques des œuvres protégées.

Comment les systèmes sécurisés savent-ils les règles qui doivent être respectées ? La Société *Xerox* et d'autres ont tenté de décrire les montants des droits et les modalités précises d'utilisation dans un langage formel qui sera interprété par les systèmes sécurisés. Le recours à un tel langage est essentiel pour l'édition électronique : les vendeurs et les acheteurs ne pourront négocier et parvenir à des accords que si l'ensemble des actions autorisées ou interdites est explicitement défini. Les droits numériques sont de plusieurs types. Les droits de transport concer-

nent l'autorisation de copier, de transférer ou de charger. Les droits d'interprétation concernent l'autorisation de jouer et d'imprimer. Les droits de reproduction concernent l'extraction d'information, l'édition de cette information et son insertion dans d'autres publications. D'autres droits régissent la création et l'utilisation des copies de sauvegarde.

La sécurisation à l'œuvre

Les exigences de sécurité variant avec la nature des œuvres intellectuelles, les systèmes sécurisés permettent aux éditeurs de définir le degré de maîtrise qu'ils veulent conserver sur les documents écrits, sonores ou vidéo. Les œuvres numériques les plus précieuses peuvent être protégées par des systèmes qui détectent toute tentative de déverrouillage, déclenchent alors des alarmes et effacent l'information abusivement utilisée. À un niveau inférieur, les systèmes sécurisés pourraient seulement éviter les tentatives d'effraction banales en demandant un mot de passe. À un niveau encore plus élémentaire, ils marqueraient seulement les œuvres d'une signature numérique, de sorte que le propriétaire soit associé à son œuvre de façon indélébile (certains logiciels de manipulation d'images apposent déjà ce type de filigrane numérique).

La plupart des ordinateurs sécurisés savent reconnaître un autre système sécurisé, faire respecter les droits d'usage et présenter les œuvres de sorte qu'elles ne puissent être copiées exactement ou qu'elles contiennent constamment la marque de leur origine. Pour exécuter les transactions en toute sécurité, deux systèmes sécurisés utilisent un canal de communications, tel le réseau Internet, pour s'échanger des preuves de leurs identités. On peut ensuite gérer les communications sur un canal sécurisé à l'aide d'un cryptage et de ce que l'on nomme un protocole d'authentification.

Par exemple, si un ordinateur A veut communiquer

avec un ordinateur B, il doit prouver à B qu'il est un système sécurisé et que son identité est bien celle qu'il déclare sienne. L'interaction commence alors par l'envoi, de A à B, d'un certificat numérique qui confirme qu'il est enregistré dans ce système sécurisé. L'ordinateur B déchiffre alors ce certificat, mais il doit s'assurer que A est bien celui que le certificat atteste, et qu'il n'utilise pas frauduleusement un certificat volé : aussi, l'ordinateur B compose une chaîne de nombres aléatoires, qu'il chiffre à l'aide d'une clé publique contenue dans le certificat numérique envoyé par A. La clé publique permet à B d'envoyer des messages que seul A comprend lorsqu'il les déchiffre avec sa propre clé.

A doit ainsi déchiffrer le message renvoyé par B et retourner un message non chiffré contenant la chaîne aléatoire sélectionnée. Si la chaîne renvoyée en clair est bien celle qui avait été envoyée par B, ce dernier sait qu'il est en communication avec A, car seul A pouvait déchiffrer le message avec sa clé privée. Quelques étapes supplé-

mentaires permettent ensuite aux deux ordinateurs d'effectuer la transaction prévue, telle que le transfert d'un livre sous une forme numérique.

Les systèmes sécurisés n'utilisent pas tous un protocole d'authentification, mais la plupart échangent des œuvres sous une forme cryptée. Ils peuvent aussi composer d'autres systèmes de sécurité : des horloges infalsifiables qui empêchent un utilisateur d'exercer des droits périmés ; des mémoires inviolables qui enregistrent les opérations financières ; des connexions permanentes avec un bureau central lors des transactions.

Les systèmes sécurisés peuvent placer des filigranes d'identification qui permettent de localiser des copies ou des modifications non autorisées. Ces filigranes enregistrent la désignation de l'œuvre, le nom de l'acheteur et le code des appareils sur lesquels l'œuvre est utilisée. Dissimulée dans les blancs d'un texte, une telle information ne gênerait pas les utilisateurs honnêtes, mais elle ne pourrait être effacée par les fraudeurs.

Les éditeurs devraient continuer à surveiller la diffusion non autorisée de leurs œuvres, car on pourra toujours photocopier une page que l'on aura imprimée, ou filmer un écran d'ordinateur à l'aide d'une caméra vidéo. En revanche, les systèmes sécurisés empêchent la diffusion à grande échelle de copies parfaites des originaux numériques. En outre, certains filigranes permettront de suivre la trace des copies piratées.

Grâce à ces systèmes, les pratiques commerciales de l'édition numérique ne devraient guère différer de celles de la diffusion des œuvres imprimées. Supposez que Christian veuille acheter un livre numérique proposé par un éditeur du réseau Internet.

La copie du livre résulte d'une transaction entre le système du vendeur et l'ordinateur de Christian ; lors de la transaction, Christian doit notamment utiliser sa carte de crédit ou son argent numérique pour payer l'exemplaire du livre qu'il lira sur son ordi-



1. ÉCOUTEZ AVANT D'ACHETER! Cette technique de vente pratiquée dans les magasins de disques pourrait apparaître sur le réseau Internet, grâce aux systèmes sécurisés, qui permettent de «tester» les œuvres numériques avant de les acheter.

nateur personnel ou sur tout autre dispositif de consultation. Toute la transaction, naturellement, est précédée d'un échange d'informations qui garantit au vendeur que la machine de Christian est sécurisée.

Applications des droits d'usage

Christian peut offrir son livre numérique comme il le ferait avec un livre papier : son ami Jean-Baptiste lui demande le livre, Christian lui cède gratuitement ses droits, mais, à la fin de la transaction entre Christian et Jean-Baptiste, le livre se trouve sur le lecteur de ce dernier et il n'est plus sur celui de Christian. Jean-Baptiste peut alors lire le livre, et Christian ne le peut plus. Ainsi le nombre total d'exemplaires n'est pas modifié par le transfert ; les droits de Christian et de Jean-Baptiste, après avoir lu les droits insérés dans le fichier contenant le livre, effectuent le transfert sans que les utilisateurs interviennent.

Christian peut également prêter un livre à un ami. Si Raphaël veut lui emprunter un livre pour une semaine,

Christian transfère le livre sur l'ordinateur de Raphaël, mais, tant que le livre est prêté, Christian n'y a pas accès. Une fois la semaine écoulée, l'ordinateur de Raphaël désactive la copie du livre, et celui de Christian récupère le droit d'utiliser le livre. Sans la moindre intervention des deux amis, le livre a été « rendu ». Le droit de prêt est une clause essentielle à la constitution de bibliothèques numériques.

Les droits d'usage peuvent s'appliquer à la lecture des œuvres, à leur impression, ou à la création d'œuvres dérivées. Certains droits peuvent être gratuits et d'autres non, selon les volontés des auteurs et des éditeurs. Pour certaines œuvres, l'éditeur peut autoriser la copie, mais faire payer la lecture. Les droits peuvent être limités dans le temps ou dans l'usage ; ils peuvent concerner uniquement l'acquisition de l'ouvrage ou bien s'appliquer à chaque utilisation. L'éditeur peut faire des ristournes, des soldes, accorder des utilisations gratuites. Il peut limiter la diffusion aux personnes appartenant à des groupes, tels les membres d'un cercle de lecture, des personnes d'une classe d'âge ou d'un pays particulier.

Les systèmes sécurisés peuvent aussi respecter les clauses qui sont aujourd'hui en vigueur dans les bibliothèques et dans quelques autres institutions, autorisant, par exemple, un nombre raisonnable de copies ou de citations. Certaines catégories professionnelles – les bibliothécaires, les chercheurs, les enseignants – pourraient acquérir des licences leur permettant de faire gratuitement ou à prix réduit un certain nombre de copies d'une œuvre, à condition de respecter les droits d'auteur. Pour remédier aux copies illégales, on pourrait créer des caisses de compensation qui dédommageraient les éditeurs des manques à gagner.

Quels avantages les systèmes sécurisés procureront-ils aux utilisateurs ? Pourquoi ces derniers devraient-ils accepter un système ne leur offrant pas, c'est le moins qu'on puisse dire, un contrôle absolu sur le matériel et les données en leur possession ? Pourquoi devraient-ils payer alors qu'ils pourraient avoir tout gratuit ? Parce que, si les droits de propriété intellectuelle ne sont pas respectés, les grandes œuvres ne seront jamais proposées sous forme numérique, ni gratuitement ni à titre

TRANSFERT



PRÊT



2. LE TRANSFERT D'UNE ŒUVRE NUMÉRIQUE d'un système sécurisé à un autre ressemble à un transfert d'argent entre deux comptes bancaires. L'argent ne peut se trouver simultanément sur les deux comptes. Les droits de propriété distinguent le droit de copier une œuvre numérique (ce qui accroît le nombre d'exemplaires) et le droit de transférer cette œuvre (ce qui conserve le nombre d'exemplaires). La copie

d'une œuvre exige ordinairement une rémunération, tandis que son transfert est gratuit. Le prêt d'une œuvre numérique est une autre transaction, distincte de la copie et du transfert. Il est analogue au prêt d'un livre : il accorde temporairement la jouissance de l'œuvre à une autre personne ; le propriétaire de l'œuvre ne peut l'utiliser tant qu'elle est prêtée.

(Work: (Rights-Language-Version: 1.0)
 (Description: "Title: 'Peter Atkins - Chaleur et désordre'
 Copyright 1994 Pour la Science")
 (Work-ID: "vanitypresskey-stry-lkjdf98734")
 (Owner: (Certificate:
 (Authority: "Centre Français
 du Copyright")
 (ID: "Pour la Science"))))
 (Rights-Group: "Édition
 (Bundle:
 (Fee: 100 (123456789 (House: "VSA")
 (Copy: (Fee: 100 (123456789 (House: "VSA")
 (Transfer:)
 (Play:)
 (Print:)
 (Fee: Per Use: 10))
 (Printer:
 (Certificate:
 (Authority: "DPT"
 (Type: "PascalPrinter 0"))
 (Watermark:
 (Watermark-Str: "Title: 'Peter Atkins - Chaleur
 et désordre',
 Copyright 1994 by Pour la Science.
 All Rights Reserved."
 (Watermark-Tokens: user-id institution-location
 render-name render-location
 render-line))))

Information
pour suivre
une œuvre

Jennifer C. Christiansen

3. LES DROITS D'USAGE, qui définissent les modalités de jouissance d'un livre numérique – ici, *Chaleur et désordre*, de Peter Atkins – protégé par un système sécurisé, sont écrits dans un langage interprétable par les ordinateurs sécurisés.

payant. Les systèmes sécurisés pallient le manque de contrôle en vigueur sur le réseau Internet. Ils permettent l'accès à des bibliothèques, mais aussi à des librairies, à des kiosques, à des cinémas, à des discothèques et à d'autres services dans le domaine de l'information numérique. Ils facilitent l'accès, en tout point du Globe et 24 heures sur 24, à des romans, à des films ou à des musiques de qualité. Mieux encore, cette approche technique de la protection des auteurs et des éditeurs pourrait éviter une législation qui risquerait d'asphyxier la diffusion numérique.

La mise en place de cette protection exigera des travaux techniques et des discussions commerciales : les systèmes sécurisés devront laisser les utilisateurs accéder facilement aux services, et les éditeurs devront imaginer des mesures garantissant la confidentialité des informations recueillies sur les utilisateurs. Le recours aux systèmes sécurisés suppose également que ce seront les ventes directes, et non la publicité, qui paieront la diffusion des œuvres digitales. La publicité ne prédominera probablement que pour les ouvrages grand public. En protégeant les droits d'auteur, les systèmes sécurisés permettront l'épanouissement de l'édition spécialisée : comparez, par exemple, les diverses collections de livres dans une bibliothèque et la relative indigence des programmes de télévision.

La compétitivité du marché est l'obstacle le plus important à l'instauration d'une protection des œuvres numériques. Plusieurs sociétés testent aujourd'hui des systèmes et des logiciels sécurisés, mais, à quelques exceptions près, ces programmes sont incompatibles, et leur usage n'est pas toujours autorisé. Si la technique peut déjà créer l'infrastructure du commerce numérique, les divers protagonistes de ce secteur, des acheteurs aux vendeurs en passant par les bibliothèques et les législateurs, n'en retireront de grands bénéfices que s'ils acceptent de travailler ensemble.

Mark STEFIK est directeur de recherches au Centre de recherches Xerox, à Palo Alto.

Ann CHERTON, *Les droits d'auteurs des œuvres numériques*, in *Pour la Science*, septembre 1996.

Forum on Technology-Based Intellectual Property Management: Electronic Commerce for Content, in *Interactive Multimedia News* (numéro spécial), sous la direction de Brian Kahin et Kate Arms, vol. 2, août 1996.

Mark STEFIK, *Letting Loose the Light: Igniting Commerce in Electronic Publication*, in *Internet Dreams: Archetypes, Myths and Metaphors*, sous la direction de Mark Stefik, MIT Press, 1996.

Transferts rapides

JACQUES DUPRAZ

L'ATM est un mode de transfert rapide d'informations numériques qui conserve l'intégrité des messages quand ils transitent sur un réseau de télécommunications. Sera-t-il utilisé sur l'Internet ?

Ceux qui utilisent le réseau mondial savent combien le chargement des pages qui contiennent des images ou des films est lent ! Sur les autoroutes de l'information, lorsque le volume des échanges aura été multiplié par 10 ou par 100, les temps de téléchargement deviendront rédhibitoires. La technique de transfert asynchrone, désignée par l'acronyme anglais ATM, résoudrait le problème, alors que le débit des transmissions classiques est inférieur à quelques millions de bits par seconde (un bit est un chiffre binaire 0 ou 1), on a déjà réalisé des transmissions ATM à plus de deux milliards de bits par seconde.

Bientôt, outre le téléphone et la télévision, toutes les informations seront numérisées : documents, peintures, etc., sans mentionner les mondes virtuels du futur ! Ces informations seront accessibles, en permanence, à travers un réseau à haut débit, par toute personne disposant d'un ordinateur.

Les télécommunications ont beaucoup progressé grâce à l'introduction de l'optique : fibres optiques, lasers, etc. C'est l'optique qui offre les débits nécessaires à la prolifération des échanges et aux nouveaux services «large bande» : images, vidéo et données informatiques rapides (plus la bande est large, c'est-à-dire plus la gamme de fréquences transmises est grande, plus le débit est élevé ; une fibre optique a une bande passante cent millions de fois plus large qu'un câble téléphonique). Grâce à l'optique, on a aussi amélioré la qualité des transmissions numériques et on a simplifié les protocoles de transfert.

Une nouvelle étape s'annonce : le regroupement des informations numériques, quelle que soit leur nature, en paquets, c'est la «paquetisation». L'ordinateur de l'utilisateur segmente les données à envoyer en blocs de longueur fixe ou variable. Chaque bloc devient un paquet par l'adjonction d'un en-tête qui contient toutes les données nécessaires à son transfert vers le destinataire. Deux techniques sont d'actualité : l'ATM qui utilise des paquets de longueur fixe, nommés cellules, et la technique de paquets de longueur variable utilisée sur Internet. Conçues en vue d'objectifs différents, elles sont à la fois complémentaires et concurrentes.

Vers les autoroutes de l'information

La première démonstration de l'ATM a eu lieu en France, en 1985, au Centre national d'études des télécommunications de Lannion (voir *Prélude, le réseau de communication du futur*, par Jean-Pierre Coudreuse, *Pour la Science*, n°122, décembre 1987). En 1988, l'Union internationale des télécommunications a recommandé l'usage de l'ATM pour l'infrastructure des futurs réseaux publics à large bande». Il continue, depuis, à publier des documents de normalisation et de standardisation qui sont mondialement suivis.

En 1990, quelques industriels de l'informatique créent, aux États-Unis, le forum ATM, afin de promouvoir l'usage de l'ATM dans les réseaux privés et de publier des recommandations visant à faciliter l'interopérabilité d'équipements d'origines

diverses. Le forum associe aujourd'hui près de 1 000 membres, parmi lesquels figurent les grands opérateurs publics et privés.

Tandis que les travaux de standardisation se poursuivent, les opérateurs vérifient sur le terrain la validité des options retenues. Fin 1992, de grands opérateurs publics européens lancent l'Europilote, qui devient le plus grand réseau mondial ATM. Il est destiné à l'expérimentation en vraie grandeur et à grande échelle des premiers services ATM et de leur gestion. Associant aujourd'hui 20 opérateurs et rebaptisé JAMES (*Joint ATM Experiment on European Services*), le projet se poursuit avec l'expérimentation de services plus évolués, notamment de services commutés analogues au service téléphonique, et de services de paquets Internet transportés dans des cellules ATM.

Les grandes entreprises s'intéressent à l'ATM dans le cadre de la construction d'autoroutes de l'information. Ainsi, depuis avril 1997, la Société Renault utilise un réseau ATM mis en place par France Télécom pour travailler à distance (visioconférence, conception assistée par ordinateur) entre des centres de recherche situés en France et en Espagne. Des projets comparables se déroulent ailleurs dans le monde, notamment en Amérique du Nord.

La technique ATM

L'ATM est une technique conçue pour le transfert rapide d'informations numériques par les réseaux de télécommunications. Elle utilise des cellules de 5 octets (un octet comprend huit chiffres binaires) pour transporter des blocs de 48 octets avec un en-tête de 6 octets entre des sources et des récepteurs reliés par des liens de transmission. Les cellules traversent des nœuds de commutation où elles sont aiguillées vers des directions différentes selon l'adresse inscrite dans leur en-tête. L'ATM opère en «mode connecté» : le chemin suivi par les cellules est déterminé avant le transfert, et les ressources nécessaires, notamment en bande passante, sont réservées. Ainsi, l'émetteur est-il assuré que le message parviendra dans son intégrité.

À l'inverse, dans le protocole de transmission utilisé sur l'Internet

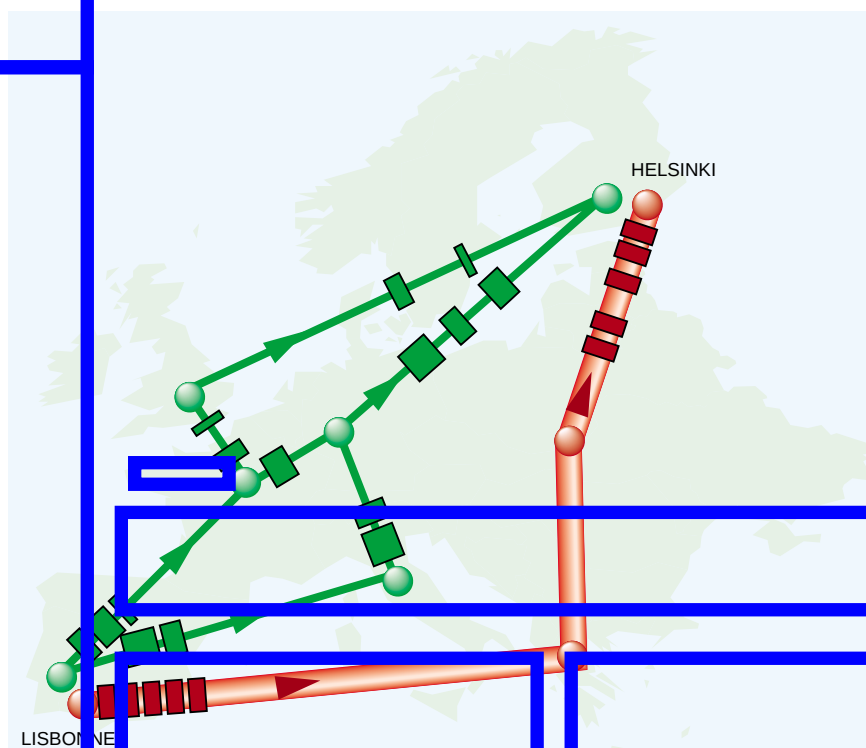
(nommé TCP/IP), le transfert de paquets s'effectue en «mode non connecté» : il n'y a pas de chemin prédéfini ni de ressources réservées, et chaque paquet d'un message se propage dans le réseau de façon autonome, indépendamment des autres paquets. C'est le récepteur final qui doit recomposer le message, en récupérant progressivement des paquets qui peuvent avoir suivi des chemins différents.

L'ATM peut être utilisé pour transporter n'importe quel type d'information. On distingue trois grandes familles : la parole, la vidéo et les données informatiques. Chacune a ses spécificités que l'ATM respecte grâce à la souplesse d'usage des cellules. On peut ainsi intégrer sur un même support physique tous les types de services, ce qui est un avantage considérable. De surcroît, comme toutes les techniques de paquets, l'ATM optimise le transfert en utilisant des cellules uniquement lorsque les sources sont actives et ont effectivement des informations à transmettre. On peut aussi faire du multiplexage statistique, c'est-à-dire profiter des périodes de silence de certaines sources pour insérer des cellules provenant d'autres sources : sur un réseau de parole, par exemple, tout le monde ne parle pas en même temps.

On comprend que, pour profiter de ces avantages, il faille connaître le comportement des sources et le trafic qu'elles engendrent. C'est relativement aisé pour les sources de parole, un peu moins pour les sources vidéo comprimées dont le débit est aléatoire, mais cela devient difficile, voire impossible, pour les sources de données qui ont une activité imprévisible et qui travaillent à des débits très variables. Ainsi, le dimensionnement et l'utilisation d'un réseau ATM pose encore quelques problèmes.

L'ATM et les services

Les concepteurs de l'ATM voulaient initialement répondre à un double besoin des opérateurs publics : offrir des services «large bande», notamment vidéo, et intégrer tous les services sur un même support. L'intérêt de l'ATM a ensuite été perçu par les informaticiens, si bien qu'aujourd'hui, ce sont eux qui poussent au déploiement de cette technique dans les réseaux privés. Inévitablement se



UN MÊME MESSAGE est envoyé de Lisbonne à Helsinki. Sur le réseau Internet (en vert), les données sont découpées en paquets de longueurs variables, qui sont acheminés indépendamment. Sur un réseau ATM (en rouge), les données, découpées en paquets de longueur fixe, voyagent comme des wagons sur des rails.

pose alors le problème de l'interconnexion des réseaux locaux d'entreprise et des réseaux publics : il importe aussi de préserver les investissements, souvent considérables, consentis avec des techniques antérieures. La souplesse de l'ATM devrait permettre d'y parvenir et de fédérer les autres techniques de transfert en utilisant la cellule comme un conteneur universel, apte à transporter des paquets d'autres protocoles.

Le réseau Internet a été créé pour la transmission de données et l'interconnexion de réseaux locaux. À la différence de l'ATM, il opère en mode non connecté, ce qui est la technique habituelle des réseaux locaux. Fort de sa popularité, Internet cherche à transmettre la parole et la vidéo, ce pour quoi il était *a priori* mal adapté. À cette fin, des équipes élaborent de nouveaux protocoles, se rapprochant de l'ATM par certains aspects, notamment la réservation de ressources.

L'ATM, de son côté, intègre difficilement sur le même support (la file d'attente) des services aux contraintes aussi différentes que la parole, la vidéo et les données. Il évolue donc en introdui-

sant des mécanismes de priorité dans les files d'attente et des protocoles de contrôle de flux qui se rapprochent des techniques traditionnelles des réseaux de paquets.

Les deux modes ont leurs avantages et leurs inconvénients. Les services de données s'accommodent bien du mode non connecté, surtout lorsque les messages sont courts, tandis que les services «en temps réel» (parole, vidéo) sont mieux traités en mode connecté. Ce qui pose problème, avec l'une et l'autre technique, c'est le mélange de tous les types de services. À cet égard, de par la richesse de ses potentialités de traitement et de signalisation (l'ensemble des protocoles permettant à l'utilisateur de dialoguer avec le réseau pour établir une connexion), l'ATM semble mieux placé. Les deux techniques devront probablement cohabiter, mais seule l'expérience permettra de définir la part qui reviendra à chacune d'elles.

Jacques DUPRAZ a travaillé pour la Société Alcatel.

Les archives d'un réseau actif

BREWSTER KAHLE

L'archivage des documents créés et échangés sur le réseau Internet pourrait être historiquement, commercialement et politiquement important.

Au I^{er} siècle avant notre ère, les manuscrits de la bibliothèque d'Alexandrie ont disparu dans un incendie ; les premiers livres imprimés sont tombés en lambeaux ; une grande partie des tout premiers films ont été recyclés, parce qu'ils contenaient de l'argent... Malheureusement, l'histoire pourrait se répéter avec le réseau Internet.

Personne n'a tenté d'archiver intégralement les textes et les images contenus dans les documents qui apparaissent sur le Web. Comment, alors, éviter la perte de précieuses informations historiques, culturelles et scientifiques ?

Avec la diminution constante des coûts du stockage numérique, un petit groupe de techniciens, dotés d'ordinateurs personnels et de dispositifs de stockage de données, pourrait archiver en permanence les documents diffusés sur le réseau mondial. Avec quelques collègues, nous avons commencé cette tâche colossale voilà un an, dans le cadre du projet *Internet Archive*.

Lorsque ce numéro de *Pour la Science* sera en kiosque, nous aurons enregistré quasiment toutes les parties du réseau qui sont librement et techniquement accessibles. Cet ensemble de données, soit 2 000 milliards d'octets (deux téra-octets), comprendra du texte, des images, des sons (la Bibliothèque nationale de France contient l'équivalent de 20 téra-octets de texte). Dans les mois à venir, nos ordinateurs et nos supports de stockage enregistreront d'autres secteurs d'Internet, dont les informations du *Gopher* (un système

d'information antérieur au Web) et les forums de discussions d'*Usenet*. Les enregistrements faits à ce jour se sont déjà révélés très utiles pour les historiens. Dans l'avenir, ils pourraient constituer le fonds d'une bibliothèque minutieusement indexée... et consultable par le réseau.

Dix personnes qui participent au projet travaillent dans une base militaire reconvertie, à San Francisco. L'ordinateur collecteur avec lequel nous recueillons les informations est situé au Centre de calcul de l'Université, de San Diego.

Nos programmes « sillonnent » l'Internet, recueillant des documents nommés « pages », site après site. Lorsqu'une page est enregistrée, ils recherchent des références croisées, des « liens » avec d'autres pages. Ils utilisent ces liens – des adresses insérées dans la page d'un document – pour se déplacer vers les autres pages, refont alors une série de copies et cherchent d'autres liens vers de nouvelles pages. Naturellement, ils vérifient que les adresses qu'ils se proposent d'examiner n'ont pas encore été visitées à l'aide des identificateurs de sites nommés « localisateurs unifiés de ressources », ou URL. Les programmes tels qu'*AltaVista*, de la Société *Digital Equipment*, emploient eux aussi un logiciel collecteur pour indexer les sites Web.

Notre projet est possible parce que le coût de stockage de données est en constante diminution. Le prix d'un giga-octet (un milliard d'octets) d'espace sur un disque dur revient à 1 000 francs, et

le stockage sur bande magnétique revient à 100 francs par giga-octet. Pour stocker les données que les utilisateurs des archives risquent de rechercher fréquemment, nous avons choisi le stockage sur disque dur, tandis que pour les données moins utilisées, nous avons opté pour un dispositif qui charge et lit les bandes magnétiques automatiquement. En moyenne, un lecteur de disques met 15 millisecondes pour accéder aux données, contre quatre minutes pour un lecteur de bandes. L'information fréquemment consultée pourrait être composée des documents historiques ou d'un ensemble de pages qui ne sont plus en service.

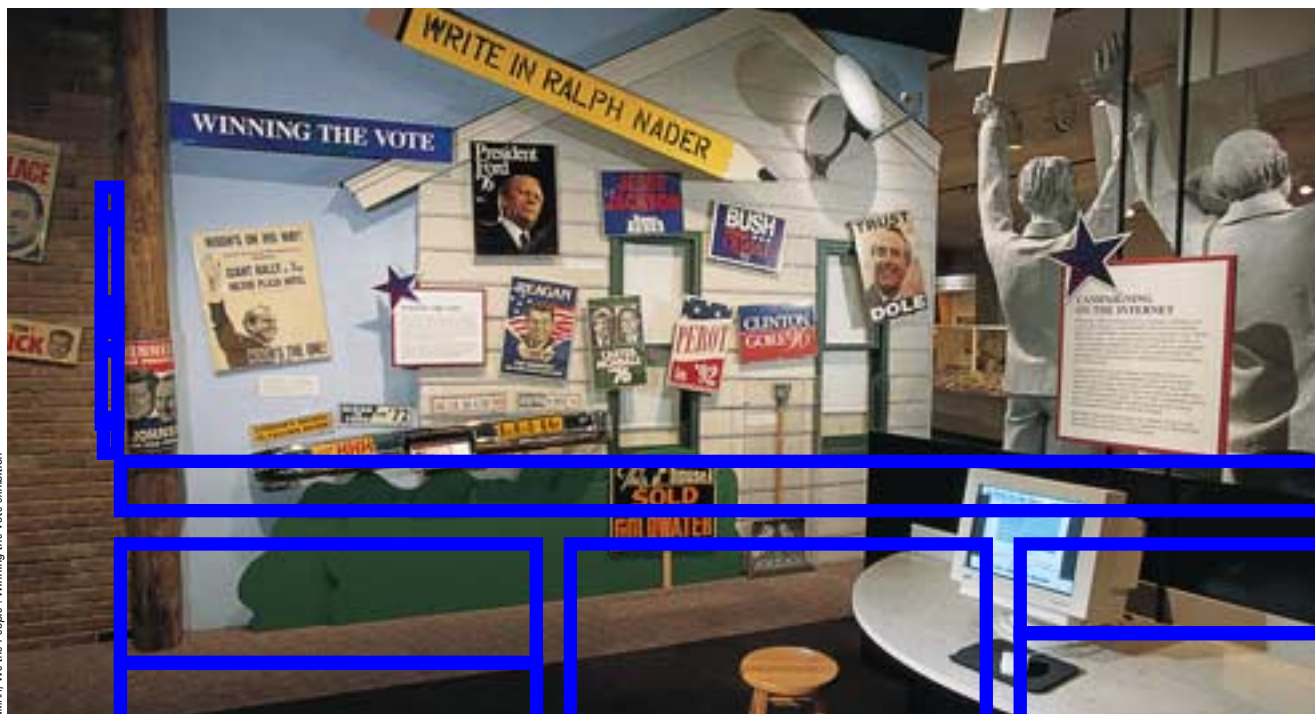
Nous comptons mettre à jour nos archives tous les deux ou trois mois. Le premier archivage complet a duré environ un an, mais, lors de nos prochaines recherches, nous ne mettrons à jour que les informations modifiées depuis notre précédente inspection.

Nous n'aurons pas tous les textes, images, films et autres données du réseau car les programmes collecteurs tels que le nôtre n'ont pas accès à des centaines de milliers de sites : les éditeurs limitent l'accès à certaines données ou stockent des documents dans un format inaccessible. Toutefois, même si notre archivage est incomplet, il donne un bon aperçu du réseau à l'époque de l'archivage.

Lorsque nous aurons stocké la partie d'Internet accessible au public, quels seront les services offerts par nos archives ? Tout d'abord, nous fournirons des documents qui ne sont plus disponibles chez les éditeurs, ce qui est un service important si le standard d'hyper Texte du réseau s'impose dans le monde avant. Nos archives pourraient également se révéler très utiles pour les entreprises. En outre, les données collectées serviraient de copies d'archives pour les services publics ou pour d'autres institutions possédant des documents accessibles au public. Ainsi, progressivement, nous disposerons d'une bibliothèque numérique.

Retrouver les liens manquants

Des historiens utilisent déjà ces archives. David Allison, de la *Smithsonian Institution*, y a trouvé des informations pour réaliser une exposition sur l'emploi des sites Web lors des élections présiden-



Museum of American History: Winning the Vote exhibition

INTERNET ARCHIVE a fourni au Musée d'histoire américaine du **Smithsonian** un ensemble de pages Web consacrées à l'élection présidentielle américaine de 1996. L'ordinateur qui accède aux pages a fait partie d'une exposition sur les campagnes présidentielles.

tielles : les expositions du passé présentaient des spots télévisés de campagnes électorales ; elles s'enrichissent aujourd'hui de pages Web.

La constitution d'archives pose plusieurs problèmes allant du respect de la vie privée à celui des droits d'auteur. Que se passerait-il si une étudiante créait une page montrant des photographies de son petit ami du moment et si, plus tard, elle voulait « déchirer » ces photos, alors qu'elles sont toujours présentes dans les archives ? Un homme politique pourrait-il effacer les données publiées durant ses années d'études ? Plus généralement, l'accès public aux informations collectées est-il un abus des clauses d'usage loyal » définies par la loi sur la protection des auteurs ? (voir *Les droits d'auteur des œuvres numériques*, par Ann Okerson, *Pour la Science*, septembre 1996).

Pour résoudre ces difficiles problèmes, nous autorisons les auteurs à exclure leurs œuvres de nos archives. Nous envisageons également de communiquer aux chercheurs non pas des documents individuels, mais uniquement un recensement des grands thèmes archivés : on pourra, par exemple, compter le nombre de références aux pachydermes sur le Web, mais non regarder une page spécifique concer-

nant les éléphants. Nous espérons que ces mesures suffiront à dissiper dans un premier temps les inquiétudes concernant le respect de la vie privée et des droits de la propriété intellectuelle. En testant sur l'Internet des concepts tels que celui d'usage loyal, nos résolutions des problèmes rencontrés au fil du temps lors de la mise en place d'Internet Archive contribueront peut-être à faire aboutir les débats politiques sur le respect de la vie privée et sur la propriété intellectuelle.

Avec Internet Archive, nous cherchons également à résoudre les problèmes de pérennisation de l'information présente sur le réseau. À Washington, la Commission « préservation et accès » cherche à éviter les pertes de données résultant des changements de standard du stockage numérique. Avec d'autres équipes, nous cherchons des critères techniques qui permettraient d'attribuer un nom d'identification unique (URN, « nom de ressource unifiée ») aux documents numériques. À la différence d'un URL, qui caractérise son emplacement sur le réseau, un URN caractérise le contenu d'un document. L'attribution d'un URN à un document permettrait de le retrouver après disparition du site qui le contenait : on estime à une quarantaine de jours la durée de vie moyenne

d'un URL. Un URN pourrait localiser d'autres URL donnant encore accès au document désiré.

D'autres projets d'archivage s'intéressent à des parties spécialisées du réseau. *DejaNews* enregistre les messages diffusés sur les forums *Usenet*, et *InReference* archive les listes de discussions par courrier électronique. Ces deux services sont financés par la publicité, ce qui pourrait également être un jour le cas d'Internet Archive. Aujourd'hui encore, nous finançons notre projet avec l'argent provenant de la vente d'une société de logiciels et de services pour l'Internet. De grandes entreprises d'informatique nous ont également donné du matériel.

De nombreuses années s'écouleront avant qu'une infrastructure ne preserve correctement les informations d'Internet et que les problèmes liés à la propriété intellectuelle ne soient résolus. Entre-temps, nous poursuivons notre archivage, car si trop de documents disparaissaient du réseau, nous perdriions toute trace de la naissance de ce nouveau média.

Brewster KAHLE a fondé *Internet Archive* en 1996. Il a créé, en 1989, le système de recherche de documents WAIS (*Wide Area Information Server*).

HIPPARCOS, satellite chasseur d'étoiles

FRANÇOIS MIGNARD • CHRISTIAN MARTIN

La position, le mouvement et l'éclat de 118 000 étoiles ont été mesurés avec une grande précision. Ces informations améliorent la mesure de l'Univers et permettent de tester les modèles de formation des étoiles.

Le 13 mai 1997, la mission HIPPARCOS achève officiellement. Après 20 années de réflexion, de mises au point, d'observations et de calculs, ce dernier-né des catalogues stellaires supplante ses prédécesseurs dans tous les domaines : il augmente à la fois le nombre d'étoiles dont la position est connue de façon absolue, par rapport à un système de coordonnées uniques, et la précision de cette position. Le catalogue HIPPARCOS contient les positions, les mouvements, les distances et les éclats de 118 000 étoiles.

Ces données seront utilisées dans toutes les branches de l'astronomie. Un premier point est d'importance : alors que les astronomes sont habituellement réduits à voir le spectacle des cieux sur une surface sphérique sans profondeur, HIPPARCOS donne une image du ciel en trois dimensions. La distance à laquelle se trouve chaque étoile du catalogue a été mesurée géométriquement : avec ces valeurs absolues, on étalonne les méthodes de mesure à plus grande distance, à partir d'hypothèses sur la physique des étoiles. Leur application progressive à des astres de plus en plus éloignés permet, en particulier, d'évaluer la taille de l'Univers.

Avec 13 millions d'observations, soit une moyenne de 110 mesures par étoile, HIPPARCOS dresse le tableau le plus complet jamais obtenu de la population d'étoiles dans un rayon de 500 années-lumière autour du Soleil. La mesure simultanée de l'éclat et de la distance donne accès à la luminosité intrinsèque des étoiles ; les variations de luminosité de plusieurs milliers d'étoiles ont été détectées et caracté-

risées ; plus de 10 000 systèmes d'étoiles doubles ont aussi été identifiés et mesurés. Ces informations nouvelles seront utiles pour l'étude de la formation et de l'évolution des étoiles. Les utilisations préliminaires du catalogue HIPPARCOS, l'étude des planètes extrasolaires, la compréhension des explosions d'étoiles ou le calcul des trajectoires d'engins spatiaux, illustrent déjà la diversité de ses usages.

En outre, à côté du catalogue HIPPARCOS, le catalogue TYCHO, réalisé avec un détecteur auxiliaire du satellite, contient plus d'un million d'étoiles, repérées avec une précision moindre. Presque toutes les étoiles qui étaient accessibles au télescope embarqué à bord d'HIPPARCOS sont ainsi répertoriées, et les astronomes pourront conduire des études statistiques sur toutes les étoiles plus brillantes que la magnitude de 11,5 (la magnitude des étoiles mesure leur luminosité).

La mesure du ciel

Le recensement des étoiles et de leurs positions dans le ciel a longtemps été l'une des activités principales des astronomes. Indispensables à la navigation, ces positions l'étaient aussi, dans une moindre mesure, aux prédictions astrolologiques. Au II^e siècle avant notre ère, le grec Hipparque recense les positions d'environ un millier d'étoiles et évalue leur éclat : il réalise ainsi le premier catalogue digne de ce nom. Les positions relevées par Hipparque avaient une précision de 0,3 à 0,4 degré, un peu plus que la largeur d'un quartier de Lune. Près de 1 500 ans plus tard, Ulugh

Begh, petit-fils de Tamerlan, réalise à Samarkand, au moyen d'un sextant de 48 mètres creusé dans le sol, un catalogue de 1 018 étoiles dont la précision moyenne est de l'ordre de cinq minutes d'angle (un degré contient 60 minutes d'angle, qui contiennent chacune 60 secondes d'angle).

Dans la deuxième moitié du XVI^e siècle, l'astronome danois Tycho Brahé mesure la position des étoiles à l'œil nu, à l'aide de longs quadrants muraux en bois ou en bronze. Son catalogue, édité par Johannes Kepler en 1627, renferme la position de 1 005 étoiles, avec une précision moyenne de deux à trois minutes d'angle, mais qui atteint 30 secondes d'angle pour certaines. Johannes Hévélius, astronome allemand brasseur à Dantzig, est deux fois plus précis dans son catalogue de 1553 étoiles publié en 1690.

L'invention des lunettes et l'adaptation de systèmes de visée vers 1660 amènent progressivement la précision à quelques secondes d'angle à la fin du XVIII^e siècle et permettent d'observer des étoiles de luminosité apparente de plus en plus faible. Au XIX^e siècle, l'observation et le traitement des données deviennent plus systématiques. Ainsi, le *Banner Sternverzeichnis*, publié en 1835 par l'allemand Friedrich Argelander, contient les positions de 458 000 étoiles. C'est le siècle des grands inventaires, où sont dressés les premiers catalogues photographiques de plusieurs centaines de milliers d'étoiles.

Les positions des étoiles contenues dans tous ces catalogues sont déterminées les unes par rapport aux autres. À l'opposé, les catalogues astrométriques



Roger Violot

J.-L. Charnet

J.-L. Charnet

D.R.

1. DE L'ASTRONOME GREC HIPPARQUE (II^e siècle avant notre ère) à la mission HIPPARCOS, la précision des catalogues stellaires a été multipliée par un million, de 0,4 degré à 0,0008 seconde d'angle. Ulugh Begh, au XV^e siècle, et Tycho Brahé, au XVI^e siècle, mesuraient la position des étoiles à l'œil nu. À partir du XVII^e siècle, l'invention de la lunette astronomique a augmenté la précision de ces relevés.

fondamentaux, plus précis, répertorient les positions absolues des étoiles, mesurées par rapport à un seul système d'axes. Leur réalisation est beaucoup plus longue et difficile : au moment où Argelander achève son œuvre monumentale, il publie aussi un catalogue fondamental de seulement 160 étoiles, dont la réalisation lui a coûté autant de peine.

L'ensemble des coordonnées des étoiles d'un catalogue fondamental constituent un système de référence, défini par ses trois directions d'un

repère galactique. Par exemple, on peut souhaiter que l'un des axes soit perpendiculaire à l'écliptique, plan moyen de l'orbite de la Terre autour du Soleil. Malheureusement il n'y a pas sur le ciel une marque colorée avec l'inscription "ici est la normale à l'orbite de la Terre". Pour connaître la coordonnée d'une étoile sur cet axe, il faut mesurer sa position par rapport à une étoile fixe, le dernier étant visible de jour et les étoiles plus aisément la nuit, on saisit la différence de ces observations

astonomiques. Un deuxième axe est déterminé par l'intersection du plan de l'Équateur terrestre et de l'écliptique. Le troisième est orthogonal aux deux premiers. Une fois déterminées les coordonnées absolues d'un petit nombre d'étoiles très brillantes, on construit les grands catalogues en mesurant la position des étoiles faibles par rapport aux quelques étoiles fondamentales présentes dans leur voisinage. Ces dernières mesures sont donc relatives et surtout, leur précision n'est pas la même sur tout le ciel.

Le premier catalogue fondamental est publié en 1818 par l'astronome allemand Friedrich Bessel, qui rattache directement au Soleil 14 étoiles observées au siècle précédent par James Bradley, à Greenwich. Ce nombre est ensuite porté à 36, et il augmente progressivement jusqu'en 1986, où il atteint 1 536 avec une précision de 0,05 seconde d'angle. HIPPARCOS augmente cette précision d'un facteur 50, sur 80 fois plus d'étoiles.

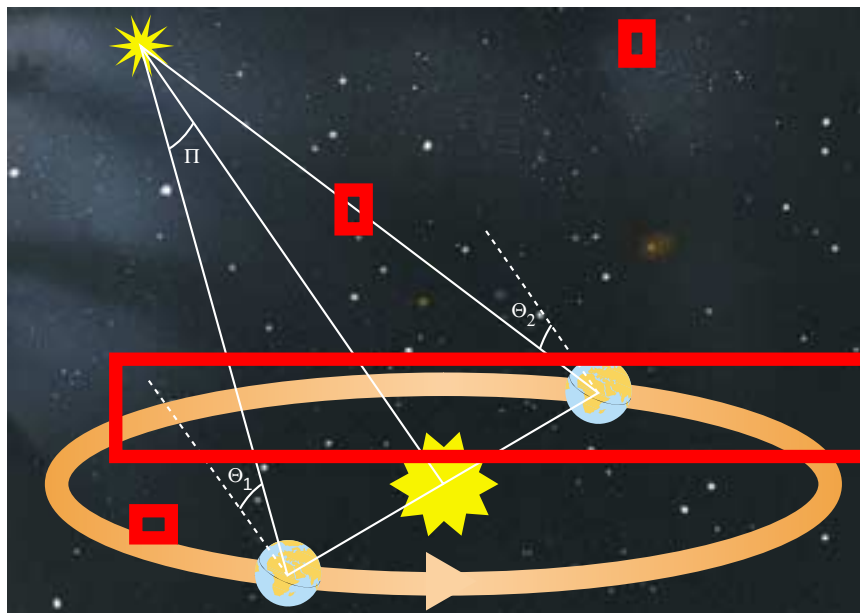
Le mouvement des étoiles

Pour construire un tel catalogue, la réalisation d'une seule mesure, même très précise, est insuffisante : par rapport à un système de référence fixe (qui ne tourne pas avec la rotation terrestre), les étoiles vues de la Terre, se déplacent sur le ciel. Edmund Halley le découvre en 1718, en remarquant que les latitudes d'Aldébaran, de Sirius et d'Arcturus obtenues quelques années plus tôt par John Flamsteed diffèrent de celles mesurées par les astronomes d'Alexandrie au début de notre ère : en 1 500 ans, Sirius s'est déplacée d'une distance angulaire égale au diamètre de la Lune. Cette conclusion audacieuse est confirmée par Tobie Mayer en 1760 pour 80 étoiles. À partir de 1866, la description est complétée par les mesures de déplacement le long de la ligne de visée, fondées sur l'effet Doppler-Fizeau (les longueurs d'onde de la lumière que nous recevons d'une étoile varient légèrement en fonction de sa vitesse le long de la ligne de visée, comme la sirène d'une ambulance change de tonalité lorsqu'elle s'approche puis s'éloigne de nous).

Le déplacement apparent d'une étoile sur le ciel (voir la figure 2) est composé de ce mouvement propre, uniforme en longitude et en latitude, et de boucles, de périodicité annuelle, dont la dimension dépend de la distance de



2. LE DÉPLACEMENT D'UNE ÉTOILE sur le ciel, dans un référentiel qui ne suit pas la rotation journalière de la Terre, ressemble à celui de l'étoile Véga, une des plus brillantes du ciel. Les points donnent la position de Véga à intervalles réguliers d'une vingtaine de jours entre 1993 et 1996. À un mouvement d'ensemble uniforme, d'environ 0,25 seconde d'angle par an en ascension droite (la longitude des astronomes) et de 0,3 seconde d'angle par an en déclinaison (la latitude), sont superposées des boucles annuelles identiques, qui résultent du mouvement de la Terre autour du Soleil. Leur dimension (0,18 seconde d'arc) permet de calculer la parallaxe de l'étoile, donc la distance à laquelle elle se trouve (22 années-lumière).



3. LA PARALLAXE D'UNE ÉTOILE est l'angle sous lequel on verrait, de l'étoile, un diamètre de l'orbite de la Terre autour du Soleil. De sa mesure, on déduit la distance à laquelle se trouve l'étoile. En pratique, on mesure à six mois d'intervalle l'angle entre une direction fixe et la direction de l'étoile : la parallaxe est la demi-somme des deux angles.

l'étoile : elles résultent du mouvement de la Terre autour du Soleil. Pour une étoile proche, ces boucles sont bien visibles et mesurables avec précision ; pour des étoiles de plus en plus éloignées, ces boucles deviennent de plus en plus petites ; à plusieurs centaines d'années-lumière, ces mouvements sont inférieurs à la précision des mesures. De l'observation de ces boucles, on déduit la parallaxe de l'étoile, l'angle sous lequel on verrait, depuis l'étoile, un segment de même longueur que le demi-grand axe de l'orbite de la Terre autour du Soleil et perpendiculaire à la ligne de visée : on connaît alors la distance à laquelle se trouve l'étoile. En pratique, on mesure la parallaxe d'une étoile en repérant sa position par rapport à une direction fixe dans le ciel, et l'on répète l'opération six mois plus tard. La parallaxe est la demi-somme des deux angles mesurés (voir la figure 3).

Le phénomène, purement géométrique, peut être vérifié par chacun à l'aide d'une expérience simple : tout en restant immobile, on observe la position de son pouce au bout du bras tendu horizontalement, tantôt de l'œil gauche, tantôt de l'œil droit, par rapport à une scène lointaine (un mur à quelques mètres suffit). Les yeux gauche et droit symbolisent la position de la Terre sur son orbite à six mois d'intervalle et le pouce représente l'étoile dont on veut mesurer la parallaxe. Lorsque l'on approche le pouce du visage, l'effet s'amplifie.

Le grand éloignement des étoiles a longtemps empêché des mesures précises de parallaxe. En 1838, Bessel publie la première mesure correcte de la parallaxe d'une étoile, celle de l'étoile 61 de la constellation du Cygne, qu'il trouve égale à 0,35 seconde d'arc, soit une distance de 10,3 années-lumière. Depuis le début du XX^e siècle, plusieurs milliers de mesures ont été réalisées à partir de clichés photographiques, mais une faible fraction a une précision meilleure que dix pour cent.

Le catalogue HIPPARCOS améliore d'un coup la précision de tous les paramètres du mouvement des étoiles. La position de la majorité des 118 000 étoiles de la mission principale est connue à mieux que 0,001 seconde d'angle (elle est un peu moins bonne pour les étoiles les moins brillantes), et les distances de 20 000 étoiles sont maintenant connues avec une précision meilleure que dix pour cent. La mission secondaire TYCHO,

menée avec les mêmes instruments, a mesuré les positions de près de 1 060 000 étoiles avec une précision moyenne de 0,01 seconde d'angle.

Cette performance est, bien sûr, la conséquence de traitements perfectionnés et informatisés des données, mais surtout de l'utilisation d'un télescope spatial. L'atmosphère qui entoure la Terre, couche gazeuse turbulente de quelques centaines de kilomètres d'épaisseur, déforme les images et limite la qualité des mesures de position. En outre, soumis à leur poids et à des variations de température, les télescopes se déforment. Ces limitations n'existent pas dans l'espace, et les observations peuvent y être beaucoup plus précises.

Un petit télescope spatial

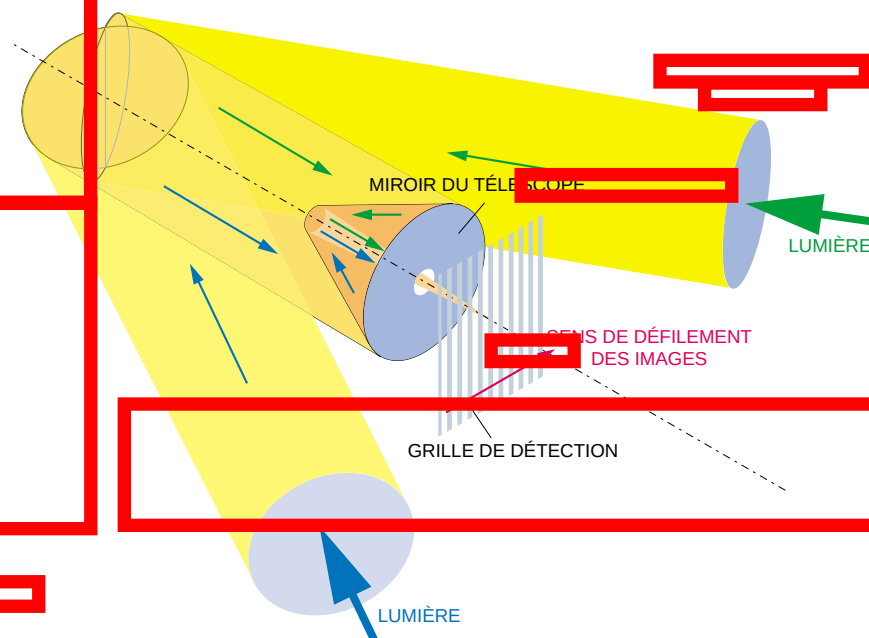
Dès 1966, Pierre Lacroute, de l'Observatoire de Strasbourg, soumet un projet de satellite astrométrique au Centre national de la recherche scientifique. La première étude de faisabilité est entreprise en 1977 par l'Agence spatiale européenne, et le projet est adopté sous le nom d'HIPPARCOS en mars 1980.

Le satellite était équipé d'un télescope de moins de 30 centimètres de diamètre, plus petit que ceux de nombreux astronomes amateurs, mais suffisant pour observer des astres jusqu'à la magnitude 12,5, éclat 400 fois inférieur à celui des étoiles les plus faibles visibles

à l'œil nu. Les étoiles étaient observées simultanément dans deux directions, à 58 degrés l'une de l'autre. Ce dispositif évitait la propagation d'éventuelles erreurs locales de position, qui se seraient amplifiées avec la distance. HIPPARCOS a mesuré une multitude d'arcs d'environ 58 degrés entre des couples d'étoiles : en traçant ces arcs à la surface d'une sphère, nous y situons toutes ces étoiles sans ambiguïté, à une rotation de l'ensemble près.

Les images des étoiles observées dans chaque direction étaient ramenées au plan focal de l'instrument grâce à un dispositif optique spécialisé. Le satellite tournait très régulièrement autour de son axe à la vitesse d'un tour toutes les 128 minutes, l'image traversait une grille composée de zones alternativement transparentes et opaques (voir la figure 4). La seule mesure directe d'HIPPARCOS était faite sur cette grille : un détecteur placé derrière analysait les variations de la lumière et localisait la position de l'étoile entre deux barreaux. La lecture automatique de la graduation était faite toutes les deux secondes, avec une précision de 0,1 micromètre.

Afin d'observer l'ensemble du ciel tous les six mois, le satellite tournait sur lui-même autour d'un axe de direction variable dans le temps en suivant une loi prédéterminée, résultat d'un compromis entre la nécessité de balayer aussi régulièrement que pos-



4. LE SATELLITE HIPPARCOS observait simultanément dans deux directions, à 58 degrés d'écart, afin de rattacher directement entre elles des zones éloignées sur le ciel. Les images provenant des deux directions étaient combinées sur le miroir du télescope, de 30 centimètres de diamètre, puis projetées sur une grille, derrière laquelle était placé le détecteur. La rotation du satellite sur lui-même faisait défiler les images entre les barreaux de la grille.

sible les différentes régions du ciel tout en observant chaque point selon de multiples directions, cela en prenant bien soin de ne jamais pointer le télescope en direction du Soleil. La distribution des observations sur le ciel présente ainsi un maximum dans les régions situées à plus ou moins 47 degrés de latitude autour de l'écliptique (voir la figure 6). Les zones proches de cette dernière ont été les moins observées. Chaque étoile a été en moyenne mesurée 110 fois, à environ 30 époques réparties sur les trois années d'observation. Les étoiles observées avaient été sélectionnées, parmi 500 000 proposées avant la mission, par un consortium d'une vingtaine d'instituts européens dirigé par Catherine Turon, de l'Observatoire de Paris.

Le satellite a été lancé le 8 août 1989. L'échec de la mise à feu du moteur d'apogée l'a laissé sur une orbite très elliptique, entre 500 et 36 000 kilomètres d'altitude au lieu de l'orbite géostationnaire prévue, à 36 000 kilomètres d'altitude. Ce handicap a été entièrement compensé par une nouvelle programmation du satellite, réalisée (dans l'angoisse en quelques semaines, et les observations, faites entre le 26 novembre 1989 et le 10 mars 1993, n'en ont pas été perturbées. Toutefois, les panneaux solaires ont été usés prématurément et les composants électroniques ont été endommagés par les passages du satellite, à chaque révolution, dans les ceintures de Van Allen, anneaux de particules chargées, capturées et accélérées par le champ magnétique ter-

restre, qui émettent un intense rayonnement électromagnétique entre 2 000 et 20 000 kilomètres d'altitude.

Deux groupes de laboratoires européens, dirigés par Lennart Lindegren de l'Observatoire de Lund en Suède, et par Jean Kovalevsky, du CERGA à Grasse ont traité les données jusqu'au milieu de l'année 1996. Un an a été encore nécessaire pour rassembler les résultats et pour écrire la documentation. L'ensemble représente 16 volumes et un atlas céleste qui donne les indications de position et d'éclat, et permet de déterminer au premier coup d'œil si l'étoile est simple, ou associée à un ou plusieurs compagnons. Un logiciel pour micro-ordinateur, distribué sur CD-ROM avec le catalogue, permet de rechercher de façon sélective tous les résultats et de les visualiser, sous forme numérique ou sur des cartes célestes. Le suivi du traitement, la production du catalogue, la distribution des données et tous les aspects scientifiques étaient pilotés par le Comité scientifique HIPPARCOS, animé par Michael Perryman, de l'Agence spatiale européenne.

Comment, à partir de la mesure des positions des étoiles sur la grille du télescope, déterminer leurs positions absolues? Pour caractériser la position d'une étoile sur la sphère céleste à tout instant il suffit de connaître cinq quantités : les deux coordonnées angulaires à une date de référence quelconque, les deux composantes du mouvement propre et la parallaxe. Préalablement aux observations du satellite, les positions de

toutes les étoiles du catalogue avaient été, par des observations au sol, déterminées avec une précision d'une seconde d'arc. À l'aide des 120 millions de mesures de position sur la grille, obtenues pendant les trois années d'activité du satellite nous avons déterminé les para-

mètres de position de chaque étoile en les faisant varier autour d'une position moyenne pour ajuster au plus près le modèle du mouvement de l'étoile aux observations réelles.

Lors de la dernière étape de calcul, nous avons résolu 4 000 000 d'équations à 600 000 inconnues, tout en estimant la qualité statistique des résultats.

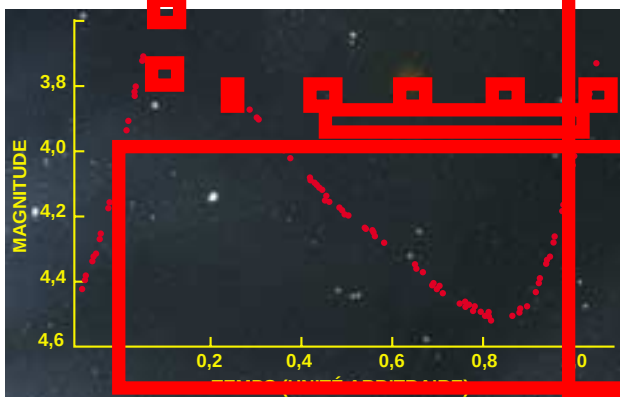
Il faut remarquer que, pour les étoiles observées à un instant donné, nous ne disposons que d'une information de position à l'intérieur d'un des 3 000 barreaux de la grille, sans savoir lequel. Cette situation est comparable à celle d'une excellente montre à quartz qui serait fournie sans aiguille des heures : on ne mesurerait que des durées courtes, et l'on ne connaîtrait que les minutes et les secondes de la date d'un événement, sans le situer dans la journée. Cette indétermination a été levée grâce à la connaissance de la position approximative des étoiles et de l'orientation du satellite au moment de la mesure : pour chaque observation, on calculait le numéro du barreau le plus probable où devait se trouver l'étoile. En cas d'incertitude entre deux barreaux, les positions étaient calculées pour les deux solutions possibles, et on retenait celle où l'écart entre la position calculée et l'ensemble des observations était le plus faible.

La luminosité intrinsèque

HIPPARCOS a mesuré l'éclat de toutes les étoiles observées. La méthode de traitement a conduit à la détermination d'une luminosité apparente bien étalonnée tout au long des trois années d'observation, malgré des variations, qui ont atteint 40 pour cent, dans la sensibilité de la chaîne de détection.

La mesure simultanée de la parallaxe, c'est-à-dire de la distance, et de l'éclat de chaque étoile permet de calculer la luminosité intrinsèque de l'étoile. On connaît donc la luminosité intrinsèque d'étoiles de types divers, dans un rayon de 500 années-lumière. En supposant que les étoiles d'un type donné ont toutes la même luminosité intrinsèque, on évalue alors la distance d'étoiles plus éloignées, dans la Galaxie et dans les galaxies les plus proches.

Cette méthode est particulièrement précise dans le cas d'une classe d'étoiles de luminosité variable, les céphéides : leur luminosité intrinsèque est reliée à la période de variation de la luminosité. Connaissant cette relation, on mesure la distance des céphéides en mesurant seulement leur éclat moyen et leur période. Ces étoiles, très lumineuses, servent d'étalon pour la mesure des distances

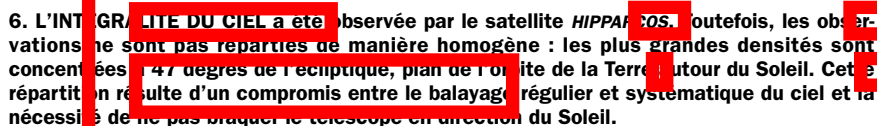


5. LA LUMINOSITÉ DES ÉTOILES de la classe des céphéides varie périodiquement au cours du temps. On obtient leur courbe de lumière en regroupant sur une seule période toutes les mesures réalisées par HIPPARCOS, comme on l'a fait ici pour Delta Cephei, dont la période est de 5,36 jours. La période des céphéides est liée à leur luminosité absolue : sa mesure donne accès aux distances des galaxies qui les hébergent. En combinant de telles mesures réalisées sur 26 céphéides, des astronomes ont calculé que l'échelle des distances de l'Univers doit être augmentée de 10 à 15 pour cent par rapport aux valeurs admises jusqu'à présent.

La plupart des étoiles passent par une phase d'instabilité au cours de leur vie, qui se traduit par des pulsations et des variations périodiques ou irrégulières de la température de surface, donc de la luminosité. Les observations de chaque étoile, distribuées sur trois ans, indiquent si la luminosité de l'étoile est variable ou constante, tout au moins dans les limites de la sensibilité du détecteur. Parmi les 11 600 étoiles reconnues variables ou probablement variables par HIPPARCOS, 8 300 étaient tenues jusqu'alors pour constantes. L'étude des étoiles dont la luminosité présente une variabilité à longue période a aussi confirmé un phénomène que l'on avait entrevu lors de mesures au sol : des sauts de luminosité sur des intervalles de temps de quelques heures, signes d'événements violents dans l'atmosphère de ces étoiles.

HIPPARCO a aussi détecté des étoiles doubles, couples d'étoiles associées par les forces de gravitation. Le catalogue contient la position relative des deux étoiles et une mesure de chacune des luminosités pour plus de 12 000 couples d'étoiles doubles, dont près de 3 000 étaient jusqu'à présent considérés comme des étoiles isolées, sans compagnon. Le caractère double de 8 000 autres systèmes stellaires est aussi suspecté, mais les mesures sont encore insuffisantes pour conclure. Plusieurs

Nous avons caractérisé ces couples d'étoiles grâce à des algorithmes mis au point avec Michel Froeschle et Jean-Louis Falin, de l'IRGA, et des équipes de Turin et de Frascati. *HIPPARCOS* n'examine pas des images du ciel, mais reçoit un signal variable en fonction du temps lorsque l'objet observé avance sur la grille placée au foyer du télescope. Pour une étoile isolée, sans compagnon, la représentation mathématique de ce signal est



7. LE CATALOGUE HIPPARCOS et le catalogue TYCHO, réalisé avec un détecteur auxiliaire du satellite, sont les plus complets et les plus précis des catalogues stellaires.

assez simple. En revanche, lorsque deux étoiles proches l'une de l'autre passent devant la grille, le détecteur additionne les deux signaux. Si la distance angulaire séparant les deux étoiles est supérieure à 0,15 seconde d'angle, nous savons séparer les deux composantes qui ont produit le signal complexe observé. En combinant les observations de l'astre dans diverses orientations par rapport aux barreaux de la grille, on retrouve sans ambiguïté la luminosité de chacune des deux étoiles, leur position relative sur le ciel et, finalement, leur parallaxe. En outre, pour certains systèmes doubles à très courte période (quelques années), nous avons détecté un petit mouvement du centre de la distribution lumineuse correspondant à sa rotation autour du centre de masse du système : les deux étoiles sont, par exemple, de même masse, mais leurs luminosités sont différentes. Dans ces cas favorables, nous avons estimé le rapport des masses des deux étoiles, et nous avons donc calculé directement ces masses.

Avant que les résultats finaux ne soient disponibles, des utilisations restreintes des résultats provisoires ont été accordées par le Comité scientifique HIPPARCOS. Si une étoile est accompagnée d'une planète, le centre des masses du système, autour duquel tournent l'étoile et la planète, ne coïncide pas avec le centre de l'étoile : celle-ci décrit alors une orbite autour du centre de masse. En décembre 1995, des astronomes ont révélé qu'une planète gravite autour de l'étoile 51 Pégase. Peu après, plusieurs autres planètes ont été annoncées, autour de 47 de la Grande Ourse et de 70 de la Vierge notamment. Ces résultats étaient obtenus par des mesures du mouvement de l'étoile le long de la ligne de visée, par effet Doppler (à chaque orbite, l'étoile s'éloigne, puis se rapproche de nous). La mesure par HIPPARCOS, avec une précision de un pour cent, des distances des étoiles a fixé une limite supérieure aux masses des planètes : 15 fois la masse de Jupiter pour 47 de la Grande Ourse et 65 fois la masse de Jupiter pour 70 de la Vierge. Pour des masses plus grandes, nous aurions, avec l'ensemble des mesures de position, détecté le mouvement de l'étoile autour du centre de masse du

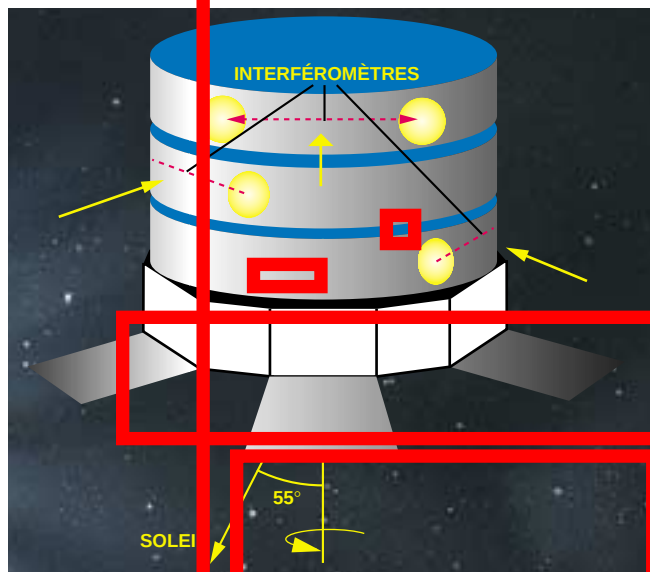
système. Ces masses sont inférieures à la limite au-delà de laquelle l'objet est une naine brune, et on dirait qu'il n'est pas allumé : c'est un élément supplémentaire en faveur de la nature planétaire de ces objets. Nous n'avons pas pu donner de limite pour la masse de la planète de 51 Pégase : le déplacement de l'étoile sur le ciel est trop faible.

Positionner la supernova

En février 1987, l'explosion d'une étoile dans les images de Magellan, à 150 000 années-lumière, a donné aux astronomes l'occasion exceptionnelle d'étudier une supernova. Les centres des images radio et optiques étaient écartés de près de 0,5 seconde d'angle : cette différence provenait-elle d'une différence d'origine des signaux, ou des systèmes de coordonnées utilisés par les radio-astronomes et par les observateurs dans le visible ? En comparant, de proche en proche, la position des étoiles du

guidage des sondes spatiales et à la préparation des rendez-vous avec les planètes ou avec les satellites. Ainsi, le groupe de pilotage de la sonde américaine *Galileo* a utilisé les mesures HIPPARCOS pour préparer la rencontre avec l'astéroïde Ida le 28 août 1993. Plus récemment, des astronomes de l'Observatoire européen austral ont calculé avec ces données un calendrier très exact de la collision de la comète Shoemaker-Levy 9 avec Jupiter en juillet 1994, permettant d'optimiser la préparation des observations.

HIPPARCOS n'a observé notre galaxie qui s'étend sur près de 100 000 années-lumière, que dans un rayon d'environ 500 années-lumière autour du Soleil. Toutefois, en combinant les mouvements propres précis et homogènes qui ont été mesurés à des mesures de vitesse le long de la ligne de visée, acquises par des mesures au sol, nous calculerons le déplacement en trois dimensions d'un grand nombre d'étoiles. Nous améliorerons ainsi les modèles de l'histoire de la Galaxie, et nous préciserons sa rotation et la répartition des masses. Grâce aux parallaxes, la fonction de luminosité, nombre d'étoiles par unité de volume et par intervalle de luminosité intrinsèque, sera calculée de manière directe pour la première fois sur un échantillon complet : nous connaîtrons mieux la population stellaire dans le voisinage du Soleil et, surtout, nous pourrions tester les mécanismes de formation des étoiles pour les situations très diverses.



8. LE PROJET GAIA, actuellement étudié par l'Agence spatiale européenne, succédera peu-être à HIPPARCOS après 2010. Le satellite transporterait trois interféromètres empilés. L'interférométrie, déjà utilisée avec des télescopes terrestres, mais jamais encore dans l'espace, produit des images plus précises que l'observation directe.

voisinage fournie par HIPPARCOS, J.E. Reynolds, L. Staveley-Smith et leurs collaborateurs, du Télescope national australien d'Epping, ont identifié un défaut local dans le système de référence optique. L'émission radio et l'émission optique ont donc la même origine et sont imputables au même phénomène, l'explosion d'une étoile en supernova.

Les données d'HIPPARCOS ont aussi été utilisées, par un curieux retour aux sources, pour la navigation : un système de référence précis est indispensable au

autres paramètres, tels que la température de surface ou le rayon des étoiles seraient déduits des parallaxes HIPPARCOS associées à des observations spectroscopiques provenant du satellite infrarouge *IRAS*, en particulier pour les étoiles naines rouges et froides.

Le satellite HIPPARCOS a fonctionné jusqu'au 15 août 1993. Les responsables de la mission au centre de contrôle de l'Agence spatiale européenne, à Darmstadt, ont alors décidé l'arrêt des opérations : diverses avaries du système de guidage et surtout des pannes à répétition de l'ordinateur de bord rendaient impossible l'acquisition des données. Quel-

ques mois après, et alors que le traitement des données n'était pas terminé, des projets ambitieux étaient déjà proposés pour sa succession. En Europe, le projet *GAIA* (acronyme anglais pour interféromètre astrométrique global pour l'astrophysique) est à l'étude depuis la fin de 1993. *GAIA* réaliserait des mesures d'une précision de 5 à 20 microsecondes d'angle, supérieure à celle d'*HIPPARCOS*, par la technique d'interférométrie optique : cette technique consiste à former une figure d'interférence avec deux images issues de deux télescopes assez distants. La résolution de l'image augmente la distance séparant les deux télescopes. Cette technique, utilisée au sol (huit interféromètres sont en service dans le monde), ne l'a jamais été dans l'espace.

GAIA serait constitué d'un empilement de trois interféromètres identiques dont les axes de visée feraient un angle constant entre eux. En outre, grâce à une sensibilité 40 fois supérieure à celle d'*HIPPARCOS*, il observerait 50 millions d'étoiles, dans six bandes de couleur. Avec un tel instrument, on mesurerait géométriquement pour la première fois des distances en dehors de la Voie lactée. Il serait lancé peu après 2010 et fonctionnerait cinq ans. Les astronomes américains ne sont pas en reste : le projet *SIM* (pour mission d'interférométrie spatiale), à l'étude pour un lancement vers 2004, vise une précision de quelques microsecondes d'angle (cinq fois supérieure à celle de *GAIA*), mais pour seulement quelques dizaines de milliers d'étoiles dont certaines seraient cent fois moins lumineuses, avec un objectif majeur : la détection et la caractérisation de planètes extra-solaires.

François MIGNARD est directeur de recherche au CNRS et dirige le CERGA à Grasse. Christian MARTIN a soutenu récemment une thèse sur le traitement des données *HIPPARCOS*.

The HIPPARCOS Mission, ESA SP-1111, 3 volumes, 1989.

HIPPARCOS : une nouvelle donne pour l'astronomie, sous la direction de D. Benest et C. Frohenne, Société Française des spécialistes d'astronomie, 1992.

Astronomy and Astrophysics, volume 304, 1995.

Roger ANGEL et Neville WOOLF, *À la recherche de la vie*, in *Pour la Science*, juin 1996.

Le fléau des maladies mentales

ARTHUR KLEINMAN • ALEX COHEN

Les troubles psychiatriques abondent dans les pays en développement, mais les soins sont insuffisants. Il est urgent de mieux comprendre les liens entre culture et maladies mentales.

Au cours des 50 dernières années, la santé et les conditions de vie des populations des pays en développement se sont beaucoup améliorées. L'espérance de vie moyenne en Égypte et en Inde, par exemple, est passée de 40 à 66 ans. La variole, qui tuait naguère des millions de personnes chaque année, a été éradiquée et la mortalité infantile est tombée de 28 à 10 pour cent des nouveau-nés. Le revenu réel moyen a doublé, et près de 60 pour cent des familles rurales ont accès à de l'eau potable, contre 10 pour cent il y a 50 ans.

Malheureusement, la santé mentale de ces populations s'est détériorée à mesure que les conditions matérielles s'amélioraient. Les cas de schizophrénie, de démence et de diverses maladies mentales augmentent dans de nombreux pays. En l'an 2000, la schizophrénie – l'une des maladies mentales les plus graves, où des hallucinations perturbent les pensées et les émotions – touchera 24,4 millions de personnes des sociétés pauvres, soit 45 pour cent de plus qu'en 1985.

Plusieurs facteurs démographiques et sociaux expliquent cette augmentation de l'incidence des maladies mentales. Tout d'abord, avec l'augmentation de l'espérance de vie, davantage de personnes atteignent un âge où les risques de certaines maladies mentales, notamment la démence, augmentent. En outre, l'augmentation de la population s'accompagne d'un accroissement proportionnel du nombre de personnes atteintes de maladies mentales. Enfin, le développement économique et industriel a souvent bouleversé les

sociétés. L'urbanisation rapide, la modernisation chaotique et la restructuration économique ont déstabilisé de nombreux pays en développement. La violence, la consommation d'alcool et de drogues et le nombre des suicides ont augmenté à mesure que s'effritaient les traditions, les habitudes sociales ou les valeurs familiales.

Les maladies mentales sont une proportion croissante des dépenses de santé dans les sociétés à faibles revenus. Selon l'Organisation mondiale de la santé, la dépression et l'anxiété sont les principales causes d'incapacité ; elles suscitent près d'un quart des consultations dans les dispensaires du monde entier. Les tentatives de suicide, la maladie d'Alzheimer, les enlacements, les psychoses, la toxicomanie et les traumatismes grèvent aussi les budgets de santé de ces pays.

De surcroît, les généralistes sont mal préparés au traitement des troubles mentaux. Non seulement le diagnostic est erroné dans plus de la moitié des cas, mais, même quand il est correct, le traitement prescrit est inadapté.

Quatre dogmes qui ont la vie dure

La psychiatrie semble démunie, car ses remèdes conviennent mal dans les pays peu industrialisés et à faibles revenus. Aujourd'hui, les psychiatres se focalisent uniquement sur la biologie de ces maladies ; négligeant les circonstances culturelles d'apparition des maladies, ils cherchent des symptômes communs, ce qui élimine des données précieuses et entrave les progrès là où ils seraient le plus nécessaires.

Plusieurs dogmes freinent les progrès de la psychiatrie dans les pays en développement : premièrement, les différentes formes de maladies mentales auraient partout la même prévalence ; deuxièmement, la biologie serait responsable de la structure de la maladie, tandis que la culture ne déterminerait que la spécificité de l'expression chez le patient ; troisièmement, des troubles rares, spécifiques de certaines cultures et de causes biologiques obscures, ne seraient pas observés dans les pays occidentaux ; quatrièmement, la psychiatrie serait démunie, sur le plan thérapeutique.

Le premier dogme est un avatar du mythe du « bon sauvage » qui vivrait libre, sans aucune des contraintes imposées par le monde moderne. Pourtant, dès les années 1950, les psychiatres ont établi que les maladies mentales sont nombreuses même dans les sociétés traditionnelles des pays en développement : une des études avait montré que la proportion des dépressions était supérieure dans les tribus Yoruba du Nigeria qu'en Nouvelle-Écosse. Plus récemment, John Orley, de l'Organisation mondiale de la santé, et John Wing, à Londres, ont montré que la proportion et la gravité des dépressions sont supérieures chez les femmes qui vivent dans une zone rurale de l'Ouganda que chez les femmes de la banlieue de Londres. Au cours des 20 dernières années, des enquêtes menées dans les populations rurales et urbaines de Chine et de Taiwan ont aussi montré que les troubles psychiatriques touchent tous les milieux. Enfin, diverses études nationales ont établi que la schi-

zophrénie atteint les populations du monde entier.

Les spécialistes de la santé mentale ont donc finalement admis que les maladies psychiatriques existent partout. Malheureusement, un mythe en a chassé un autre : au cours des années 1980, on a admis que la répartition des différentes maladies mentales était assez uniforme dans le monde, parce que l'on a supposé que les troubles avaient des causes biologiques. Cette opinion prévaut encore aujourd'hui, bien que les études anthropologiques et épidémiologiques aient établi que l'incidence et les symptômes des maladies varient notablement selon la culture, la classe sociale et le sexe. Autrement dit, la santé, aussi bien mentale que physique, dépend du statut socio-économique.

Avec une enquête dans 14 pays plus ou moins industrialisés, l'Organisation mondiale de la santé a observé que les femmes ont presque deux fois plus de dépressions que les hommes. À Santiago du Chili, c'est près de cinq fois plus. D'après une enquête menée en 1982 sur plus de 38 000 personnes habi-

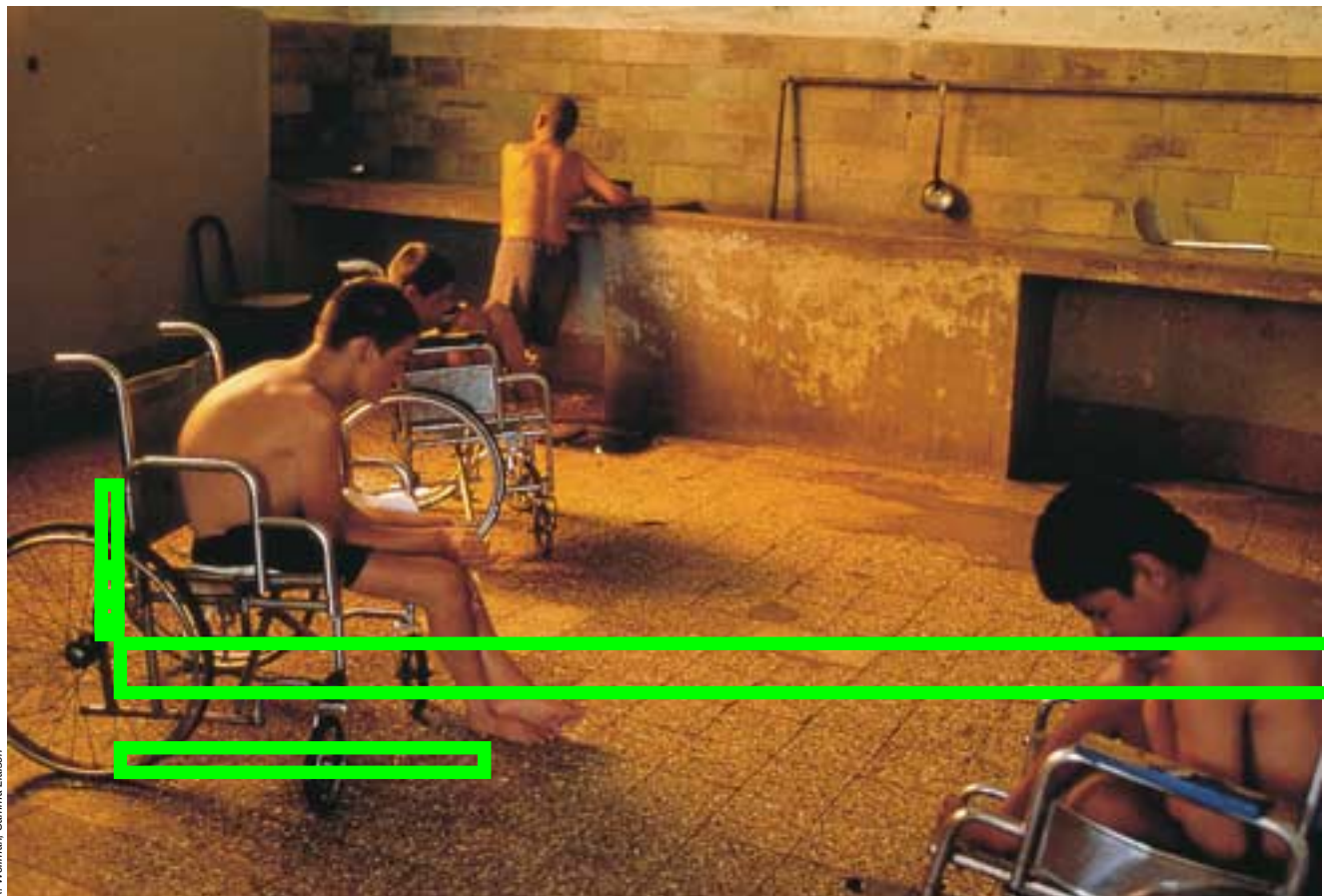
tant dans 12 régions de la Chine, les névroses (la neurasthénie, la névrose dissociative et la névrose dépressive) sont neuf fois plus fréquentes chez les femmes que chez les hommes, et la schizophrénie près de deux fois plus fréquente chez les femmes.

Cette dernière observation devrait troubler ceux qui considèrent la schizophrénie comme un trouble strictement biologique. Ils doivent admettre, soit que la composante culturelle ou environnementale de la maladie est supérieure à celle qui est généralement admise, soit que les résultats de l'étude sont contestables (à ce jour, personne n'a pourtant critiqué la méthodologie). De surcroît, le risque de schizophrénie ne semble pas supérieur pour les femmes de Taiwan.

Le nombre des suicides, souvent associés à la dépression et à la toxicomanie, est enregistré par les différents pays avec une précision variable, et il est parfois utilisé comme un indicateur de la santé du pays. Au début du XX^e siècle, le sociologue français Émile Durkheim a établi que les suicides sont plus nombreux quand

l'ordre social est troublé. À Taiwan, les psychiatres Mian Yoon Chong et Tai-An Cheng ont montré que le nombre des suicides a beaucoup changé à Taiwan depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale : ce nombre fut très élevé quand le pays s'est industrialisé, et quand des Chinois de la Chine continentale ont immigré en masse. Aujourd'hui, les chiffres se sont stabilisés, mais restent plus élevés dans les zones rurales que dans les villes, surtout parmi les populations autochtones de l'île, désorganisées par les bouleversements sociaux.

En Chine, la proportion des suicides est deux fois plus élevée qu'aux États-Unis, et les femmes de la campagne sont particulièrement menacées. Ailleurs, le risque est supérieur pour les hommes. Plus de 40 pour cent des suicides commis dans le monde le sont en Chine, alors que la dépression y est trois à cinq fois moins fréquente que dans les pays occidentaux ; la toxicomanie y est également moins fréquente. Pour les femmes atteintes de troubles mentaux dans la Chine rurale, le suicide semble être la seule issue.



R. Wolfman, Gamma Liaison

1. LES CONDITIONS D'EXISTENCE de ces patients, dans un asile argentin, sont terribles. À une époque où les maladies mentales graves augmentent beaucoup dans les pays en développement, les soins psychiatriques sont insuffisants.

Les partisans d'une origine biologique des maladies mentales expliquent mal que la répartition des divers troubles ne soit pas plus uniforme dans les différents pays. Ainsi, la schizophrénie prend plusieurs formes, dont la paranoïa, accompagnée de sentiments de persécution, et la catatonie, caractérisée par une immobilité, telle la catalepsie ou la stupeur. Une autre forme est dite hétéro-*schizophrénie* : les patients semblent insensibles ; ils ont des troubles du langage et du comportement. Les proportions des différentes formes de la maladie varient notablement selon les régions.

La schizophrénie paranoïde semble plus fréquente (50 pour cent) dans les pays industrialisés, tandis que la forme catatonique est six fois plus commune dans les pays en développement. Cette forme était jadis fréquente en Occident, mais elle a quasiment disparu aujourd'hui ; c'est maintenant la schizophrénie hétéro-*schizophrénie* qui a pris le relais (quatre fois plus fréquente). Même à l'intérieur des pays industrialisés, on observe des variations : la forme hétéro-*schizophrénie* est fréquente au Japon, par exemple, mais assez rare aux États-Unis.

Comment interpréter ces variations étonnantes ? Cette question nous ramène au deuxième dogme : dans leur quête d'unité, les psychiatres et les épидémiologistes ont construit un modèle où la biologie expliquerait l'origine et la structure des différentes formes de maladies mentales, tandis que les facteurs culturels modeleraient le « contenu » du trouble. Par exemple, dans la schizophrénie paranoïde, les hallucinations auraient un fondement biologique, mais selon les croyances culturelles du patient, le persécuteur serait un agent de la CIA, un esprit malin ou des extraterrestres.

Trop de diversité

Ce modèle n'a pas été inutile ; il a permis aux psychiatres de classer des symptômes psychiatriques variés en un nombre réduit de classes de maladies. Malheureusement, le réductionnisme a été si poussé qu'il empêche aujourd'hui de comprendre les troubles de l'anxiété, et surtout la dépression, dans les pays en développement. Dans les pays industrialisés, les

symptômes de la dépression sont des plaintes physiques aussi bien que psychologiques (un sentiment de désespoir, de tristesse, l'impression que la vie n'a plus de sens). Chez les médecins généralistes, les patients insistent surtout sur les symptômes physiques, tandis que, dans les hôpitaux, ils confient leurs troubles psychologiques. Dans les groupes ethniques traditionnels, on souligne surtout les symptômes physiques (maux de tête, fatigue, étourdissements, par exemple).

Aujourd'hui, les psychiatres considèrent que les troubles physiques masquent la maladie émotionnelle « réelle » due à une anomalie biologique. Toutefois, en l'absence de marqueurs biologiques qui caractériseraient les maladies, comment peut-on affirmer qu'un membre de la tribu Yoruba, au Nigeria, est atteint des mêmes troubles qu'un avocat parisien ou qu'un pêcheur de Nouvelle-Écosse ? Et qui peut identifier l'origine d'une dépression : des troubles émotionnels ? Un mélange de troubles émotionnels et de douleurs sans cause organique évidente ? Un trouble organique ?

Quelles que soient les réponses à ces questions, plusieurs maladies mentales, la toxicomanie, la dépression, les maladies maniaco-dépressives, l'anxiété et la schizophrénie se manifestent dans le monde entier. Pourtant, et l'on en vient au troisième dogme, certains symptômes semblent culturels. Certaines maladies « exotiques » ont été répertoriées : ainsi l'amok est un trouble caractérisé par des comportements très violents à

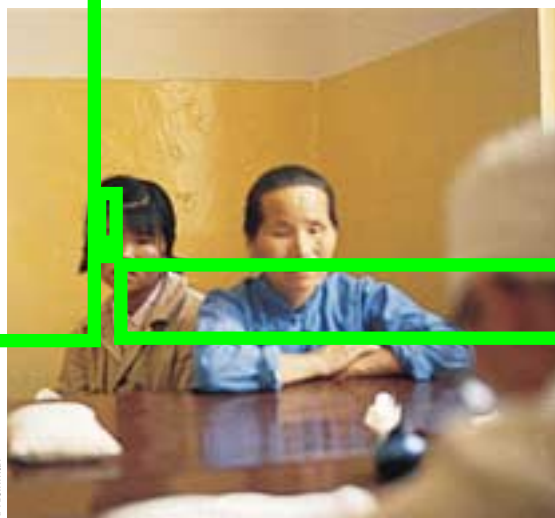
l'approche de personnes ou d'objets ; le latala se manifeste par des répétitions de mots et de mouvements après une frayeur subite. On ne trouve pas ces maladies en Occident. En revanche, la névrose anorexique, les troubles de dédoublement de la personnalité, le syndrome de fatigue chronique et l'agoraphobie sont vraisemblablement l'apanage des cultures occidentales ou des élites occidentalisées de l'Asie.

Le quatrième dogme stipule que la psychiatrie ne sait pas traiter efficacement les maladies mentales, bien qu'elles soient fréquentes et très répandues. Pourtant, on traite aujourd'hui la dépression et l'anxiété ; on soulage les patients schizophrènes en associant des médicaments antipsychotiques et une prise en charge combinant une thérapie familiale et une meilleure insertion sociale et professionnelle.

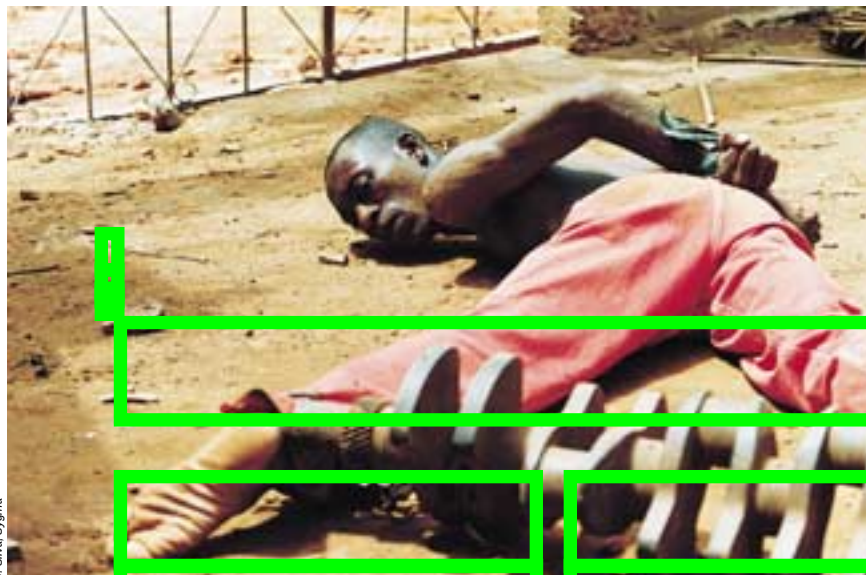
De plus, au cours des 20 dernières années, les psychiatres chinois ont mis au point des programmes de rééducation qui prennent en charge les personnes souffrant de troubles mentaux graves de façon efficace et en respectant la dignité de la personne atteinte. Ces programmes semblent applicables à d'autres populations encore négligées. On pourrait réduire le nombre des personnes atteintes d'autres troubles psychiatriques, tels que l'arriération mentale ou l'épilepsie, en essayant d'éviter les traumatismes liés à la naissance, les infections ou les carences alimentaires.

Une occasion manquée

Pour donner à la psychiatrie un statut égal à celui des autres disciplines médicales, les psychiatres ont cherché à la fonder sur les sciences « dures » et ont recherché les causes biologiques des troubles mentaux, négligeant l'importance des variables culturelles ou socio-économiques. Toutefois, les variations entre les individus, la diversité des symptômes, les conditions d'apparition et la prévalence des maladies mentales sont des données précieuses pour l'étude de l'influence de la culture et de l'environnement sur l'apparition, la répartition et les signes cliniques des maladies mentales. Jusqu'à présent, ces études ont été négligées, mais les maladies



2. CETTE FEMME ET SA FILLE souffrent de neurasthénie. Dans la province de Hunan et dans le reste de la Chine, ce trouble névrotique associe dépression et anxiété.



J. Silva, Sigma

3. TRAUMATISÉS PAR LA GUERRE CIVILE, les patients les plus violents internés dans un hôpital psychiatrique de Luanda, en Angola, étaient enchaînés à de lourdes pièces de moteurs : l'hôpital n'avait pas de camises de force. La plupart des hôpitaux psychiatriques des pays en développement n'ont pas l'équipement nécessaire.

mentales provoquent tant de souffrances dans le monde entier, que cette négligence est tragique.

Une meilleure compréhension des relations entre les cultures et les maladies mentales ne suffira pas à soulager les malades ; la prise en charge des maladies mentales, dans les pays en développement, est entravée par plusieurs difficultés, notamment parce que l'on est incapable de multiplier les programmes locaux. De plus, les pays à faibles revenus, confrontés à une pauvreté extrême et à des ressources limitées, s'attaquent d'abord aux maladies endémiques, telles que le paludisme et les diarrhées, et ne s'offrent pas le « luxe » de traiter les maladies mentales. Cette attitude compréhensible n'est pas acceptable, car quand on ne traite pas rapidement les patients dépressifs, on est ensuite confronté aux troubles secondaires, qui engendrent

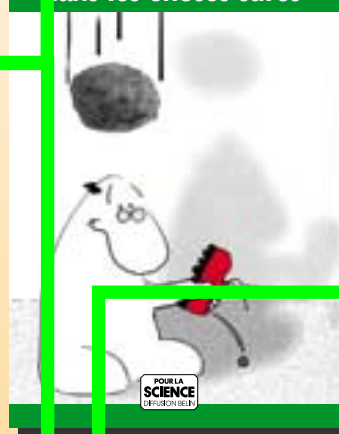
davantage de handicaps que l'arthrite, le diabète, l'hypertension ou les maux de dos.

Enfin, les psychiatres font une hypothèse qui risque d'avoir des conséquences dévastatrices : ils supposent qu'une base de données presque exclusivement établie d'après des cas Nord-américains et européens serait applicable aux 80 pour cent de la population mondiale qui vit en Asie, en Afrique et en Amérique du Sud, ainsi qu'aux communautés immigrées en Amérique du Nord et en Europe. Quels que soient les mécanismes biologiques sous-jacents, les maladies mentales surviennent dans des contextes socioculturels qui en modifient les symptômes et les conséquences. Aujourd'hui, les psychiatres doivent s'intéresser davantage aux relations entre les aspects socio-économiques, culturels et biologiques des maladies mentales.

DES CAILLOUX DANS LES CHOSES SÛRES

DIDIER NORDON

Des cailloux
dans les choses sûres



Didier Nordon épingle les scientifiques et les politiques qui traitent de la science plus qu'elle ne dit. Nul doute que chacun reconnaîtra dans ces piques... le défaut de son condisciple.

144 pages - 65 F
Code 1897

**POUR LA
SCIENCE**
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p. 98

Arthur KLEINMAN, professeur de psychiatrie, dirige le département de médecine sociale de la Faculté de médecine d'Harvard. Alex COHEN, qui travaille dans l'équipe de A. Kleinman, participe au Programme d'étude de la santé mentale et du développement de la santé.

Arthur KLEINMAN, *Rethinking Psychiatry : From Cultural Category to Personal Experience*, Free Press, 1988.
Investing in Health : World Development

Report 1991, World Bank, Oxford University Press, 1993.

Mental Illness in General Health Care : An International Study, sous la direction de T.B. Üstün et N. Sartorius, John, Wiley & Sons, 1995.

World Health Report 1995 : Bridging the Gaps, World Health Organization, 1995.

Robert DES JARLAIS, Leon EISENBERG, Byron GOOD et Arthur KLEINMAN, *World Mental Health : Problems and Priorities in Low-Income Countries*, Oxford University Press, 1995.

Kamerlingh Onnes découvre la supraconduction

RUDOLF DE BRUYN DOUBOTER

La course au zéro absolu a conduit, en 1911, à une découverte inattendue : la résistance des métaux s'annule à basse température.

Il y a un peu plus de dix ans, Georg Bednorz et Alexander Müller, de la Société IBM à Zurich, ont découvert qu'un oxyde de cuivre, de baryum et de lanthane perd toute résistance électrique au-dessous de la température critique de -238°C . On pensait que cette disparition de la résistance électrique, la supraconduction, était restreinte à quelques dizaines de degrés au-dessus du zéro absolu. La révélation de son existence à «haute température» a suscité chez les physiciens un formidable regain d'intérêt. Ils s'attachent depuis à mettre au point des matériaux supraconducteurs à des températures de plus en plus grandes. Toutefois, l'histoire de la supraconduction a commencé par une course en sens inverse, vers l'obtention d'une température aussi basse que possible.

Le principal héros de cette course, le physicien néerlandais Heike Kamerlingh Onnes, était fasciné par le froid. La température qui régnait à Stockholm le jour de décembre 1913 où il recut le prix Nobel de physique était de circonstance. Cet honneur lui était fait «pour ses travaux sur les propriétés de la matière à basse température qui ont conduit, entre autres, à la production d'hélium liquide». La nomination ne mentionne pas que, grâce à la liquéfaction de l'hélium, Kamerlingh Onnes avait découvert la supraconduction.

Kamerlingh Onnes naît en 1853 à Groningue, Nord-Est des Pays-Bas. Son père dirige une fabrique de tuiles. Le tempérament artistique de sa mère marque toute la famille : son frère et son neveu deviennent peintres, sa sœur épouse Floris Verster, un artiste renommé de Leyde, et Kamerlingh



Onnes lui-même commet quelques poésies dans sa jeunesse. S'en souviendra-t-il lorsqu'il choisira la devise rimée de son laboratoire : *Door meten tot weten* (La connaissance vient des mesures)? Kamerlingh Onnes, toutefois, ne se passionne que pour la physique.

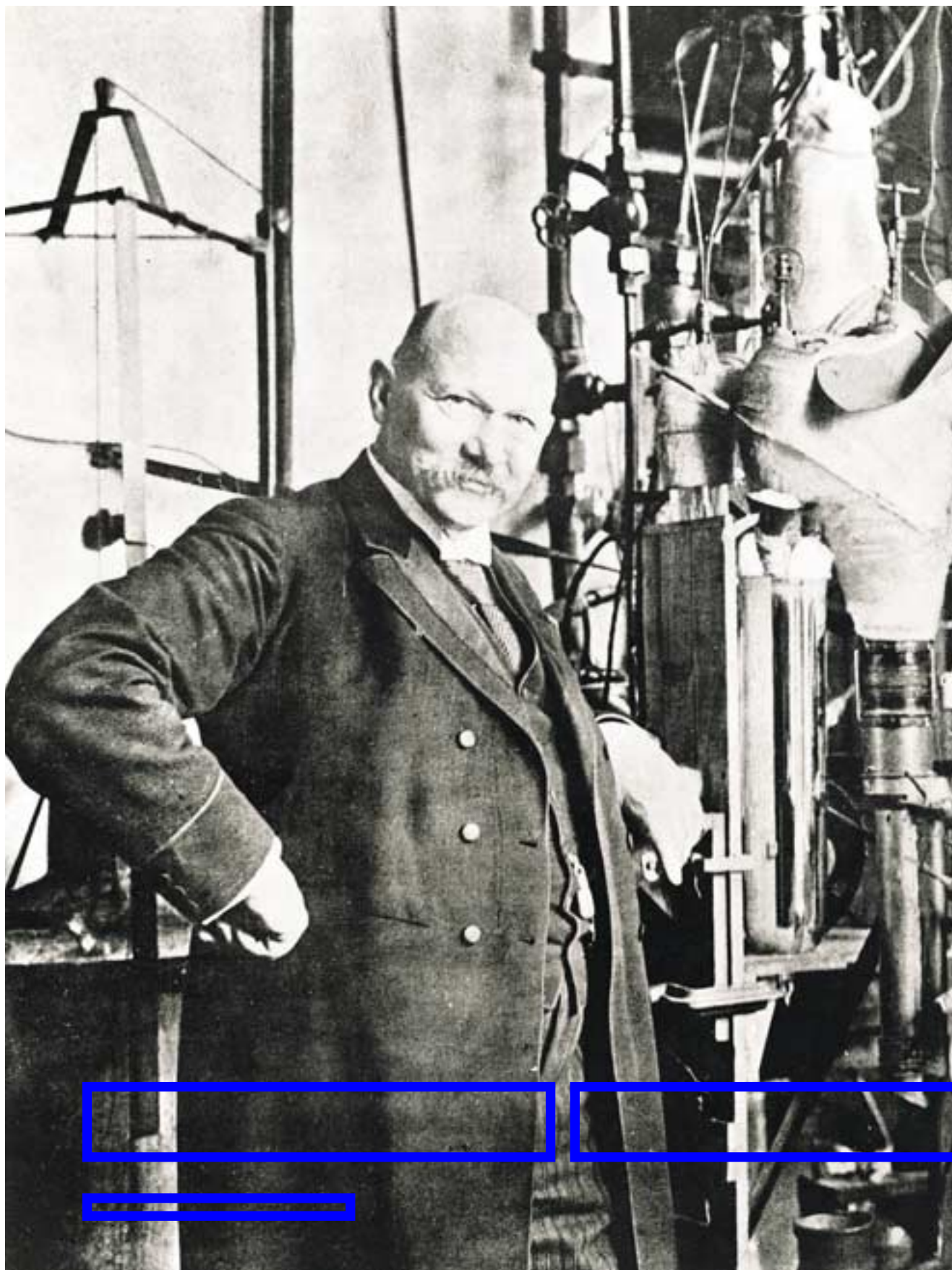
En 1871, il s'inscrit à l'Université de Groningue. Ayant obtenu une bourse, premier prix d'un concours, il part l'année suivante à l'Université d'Heidelberg, en Allemagne. Pendant trois trimestres, il étudie avec le chimiste Robert Bunsen (dont le patronyme est familier à tous ceux qui ont allumé un bec du même nom en travaux pratiques de chimie) et avec le physicien Gustav Kirchhoff. De retour à Groningue en 1873, il y travaille cinq ans avant d'y soutenir une thèse de doctorat à propos de l'effet de la rotation de la Terre sur un pendule court. Il est reçu docteur *magna cum laude*. Selon la chronique locale, les examinateurs auraient chaudement applaudi son exposé.

Du gaz parfait au gaz réel

Kamerlingh Onnes ne poursuit toutefois pas ses travaux de mécanique. Quelques mois avant la fin de son doctorat, il fait la rencontre, déterminante, de Johannes Diderik van der Waals, qui étudie le comportement des gaz à l'Université d'Amsterdam. À la fin du XVIII^e siècle, le physicien anglo-irlandais Robert Boyle, suivi du Français Edme Mariotte, avait énoncé que, à température constante, la pression d'un gaz est inversement proportionnelle à son volume. Cette loi n'est rigoureusement valide que pour un gaz parfait imaginaire, dont les molécules n'occupent aucun volume et n'interagissent pas. Avec l'amélioration des techniques de mesure, les chimistes et les physiciens notaient des écarts entre le comportement des gaz réels et la loi de Boyle-Mariotte.

Van der Waals recherche une loi plus exacte. Il met en équations le comportement des gaz en tenant compte du volume et des interactions moléculaires. En 1873, il formule la loi qui porte son nom : elle décrit le comportement des gaz avec des paramètres qui dépendent de chaque gaz. Sept ans plus tard, il publie la loi des états correspondants : la même équation décrit le comportement de tous les gaz.

En 1882, Kamerlingh Onnes est nommé professeur de physique à l'Université de Leyde. Il peut enfin consacrer librement à son grand projet : tester expérimentalement les équations de van der Waals. Bien que les techniques quantitatives soient utilisées en mécanique et en électromagnétisme, l'étude de la matière est encore qualitative.



1. KAMERLINGH ONNES, debout devant l'appareil qu'il utilisa pour refroidir l'hélium et le liquéfier (*ci-dessus*). La découverte du phénomène qu'il nomme supraconduction est une conséquence de ses recherches sur les basses températures. Depuis dix ans, on

connaît des matériaux supraconducteurs à plus de 77 kelvins, température de l'azote liquide, facilement accessible (*page précédente*) : les physiciens espèrent aussi élargir le spectre des applications de la supraconduction.

Kamerlingh Onnes a des objectifs plus ambitieux : il veut mesurer les propriétés de la matière. La rigueur mathématique qu'il a développée dans ses travaux de mécanique se révélera utile.

À basse température, le comportement des gaz s'écarte fortement du modèle des gaz parfaits, car l'énergie d'interaction entre les molécules est du même ordre que l'énergie cinétique de ces molécules. C'est donc dans ces conditions que Kamerlingh Onnes veut faire des mesures. Il doit, au préalable, mettre au point des méthodes fiables pour produire des basses températures : il crée un laboratoire de cryogénie à Leyde (ce laboratoire recevra son nom en 1932). Kamerlingh Onnes est un précurseur de la physique moderne qui utilise de grands appareils et rassemble des dizaines de chercheurs et de techniciens autour d'une seule expérience. Comme il a besoin de techniciens qualifiés, qui fabriquent les instruments complexes et précis nécessaires à ses recherches, il fonde la Société pour la promotion de la formation d'ouvriers et d'instituteurs. Cette école, au sein de l'Université, forme des techniciens, notamment des souffleurs de verre, qui travaillent pour lui, et pour de nombreux chercheurs du monde entier aujourd'hui encore.

En 1877, les physiciens français et suisse Louis Cailletet et Raoul Pictet ont réussi, indépendamment, à liquéfier à la fois l'oxygène et l'azote. Avant cette double victoire, de nombreux physiciens pensaient que l'on ne pourrait pas atteindre les basses températures auxquelles les gaz se liquéfient. Cailletet et Pictet avaient toutefois produit que de petites quantités d'oxygène et d'azote liquide. Kamerlingh Onnes a besoin d'en liquéfier de grandes quantités.

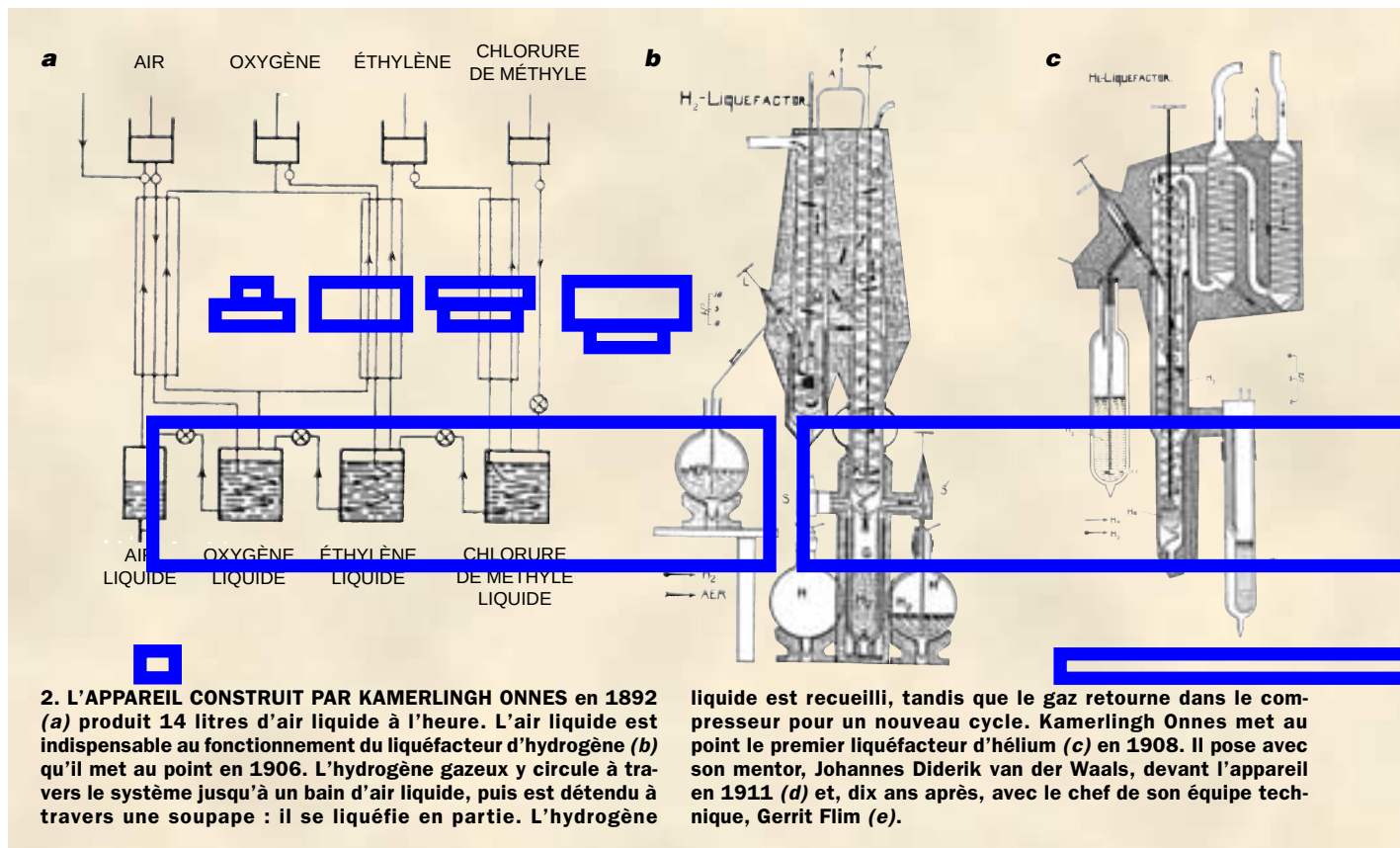
Liquéfactions en cascade

Il y parvient en 1892. L'appareil qu'il a mis au point refroidit successivement plusieurs gaz, de température de liquéfaction de plus en plus basse. Un gaz est comprimé, puis refroidi jusqu'à son point de liquéfaction. Le mélange de liquide et de gaz est alors détendu, ce qui abaisse la température (la température de liquéfaction diminue avec la pression). Le gaz va alors refroidir un autre gaz comprimé. En commençant par du chlorure de méthyle, qui se liquéfie à -24°C sous une pression de cinq atmosphères, Kamerlingh Onnes liquéfie successivement l'éthylène (-87°C à trois atmosphères), l'oxygène (-145°C à 17 atmosphères) et finalement l'air

(-193°C à une atmosphère). La liquéfaction de l'hydrogène reste toutefois impossible : elle ne se produit qu'à -253°C (soit 20 kelvins, le zéro de l'échelle des kelvins, ou zéro absolu, plus petite température possible, étant à $-273,15^{\circ}\text{C}$), température hors de portée de l'appareil de Kamerlingh Onnes.

C'est le physicien écossais James Dewar qui liquéfie le premier l'hydrogène, en 1898. Il utilise un phénomène thermodynamique nommé détente de Joule-Thomson, déjà utilisé par Kamerlingh Onnes : la température d'un gaz diminue quand on le détend à travers une paroi poreuse et sans échange de chaleur avec l'extérieur. On pensait que ce procédé était inutilisable pour l'hydrogène qui, au contraire, s'échauffe lorsqu'il est détendu de cette façon. Dewar montre que, si l'on refroidit l'hydrogène en dessous de -80°C , son comportement redevient normal : il se refroidit en se détendant. Dewar atteint ainsi la température de liquéfaction de l'hydrogène.

Kamerlingh Onnes liquéfie de l'hydrogène que huit ans après Dewar. Son retard résulte en partie de sa volonté de mettre au point un appareil qui liquéfie de grandes quantités de gaz : pour étudier les propriétés de la matière à



basse température, il lui en faut de grandes quantités. Dewar, en revanche, n'est préoccupé que par l'obtention de la plus basse température possible. Malgré les succès initiaux de ce dernier, ce sera Kamerlingh Onnes qui deviendra le «gentleman du zéro absolu».

Le retard de Kamerlingh Onnes est aussi la conséquence de la peur des habitants de Leyde. Son laboratoire est construit sur les ruines d'une partie du centre ville détruite en 1807 par l'explosion d'un navire chargé de munitions. En 1896, lorsque le conseil municipal apprend que le laboratoire contient de grandes quantités d'hydrogène comprimé, gaz spontanément inflammable, il redoute une nouvelle catastrophe. Une commission est nommée pour étudier la question mais, bien que van der Waals en soit membre et que Dewar écrive pour implorer que la recherche continue, les travaux de Kamerlingh Onnes sur l'hydrogène sont suspendus pendant deux ans.

En 1906, Kamerlingh Onnes et son équipe disposent enfin d'un appareil qui produit quatre litres d'hydrogène liquide à l'heure. Après quelques améliorations, la capacité horaire passe à 13 litres. Ce liquéfacteur comprime l'hydrogène gazeux, le fait passer dans une

zone refroidie à l'air liquide, puis lui fait subir une détente de Joule-Thomson, ce qui le refroidit assez pour en liquéfier une partie. L'hydrogène gazeux est récupéré pour un autre cycle.

L'hélium, nouvel objectif

En 1895, pendant que Kamerlingh Onnes et Dewar tentent de liquéfier l'hydrogène, en Angleterre, William Ramsay découvre que l'hélium, le plus léger des gaz rares et dont on n'avait montré l'existence, par spectroscopie, que dans le Soleil, est aussi présent sur Terre. Ses atomes interagissent très peu et sa température de liquéfaction est encore plus basse que celle de l'hydrogène. La découverte de Ramsay donne un nouvel objectif à Kamerlingh Onnes : liquéfier l'hélium.

Il lui faut d'abord se procurer du gaz. Par chance, son frère dirige le Bureau des renseignements commerciaux d'Amsterdam, et il négocie l'achat en Caroline du Nord de grandes quantités de monazite, un sable qui contient de l'hélium. Kamerlingh Onnes extrait environ 300 litres d'hélium gazeux (à une atmosphère) de la cargaison de sable.

Kamerlingh Onnes possède un atout décisif pour liquéfier l'hélium :

il peut produire de grandes quantités d'hydrogène liquide. Il met au point un nouveau appareillage qui utilise de l'air liquide et de l'hydrogène liquide comme réfrigérants et, finalement, la détente de Joule-Thomson.

Le système est prêt à fonctionner le 10 juillet 1908. La rumeur se propage dans l'Université, et un petit groupe de scientifiques vient assister à la première tentative. Vers le milieu de l'après-midi, l'hélium gazeux circule dans le circuit. En début de soirée toutefois, aucune goutte d'hélium liquide n'est encore apparue : le thermomètre refuse de descendre au-dessous de 4,2 kelvins.

Franciscus Schreinemakers, un professeur de chimie venu en curieux, émet l'hypothèse que le thermomètre a cessé de baisser parce que l'hélium liquide est déjà là mais qu'on ne le voit pas. Kamerlingh Onnes éclaire alors le récipient collecteur par le dessous. Selon ses propres termes, c'est un moment merveilleux : la surface de l'hélium liquide apparaît soudain contre la paroi de verre du récipient, tel le tranchant d'un couteau. Ivre de joie, il montre l'hélium liquide à van der Waals.

En diminuant la pression, Kamerlingh Onnes abaisse la température à



1,7 kelvin, très près du zéro absolu pour cette époque. En 1905, l'Allemand Walther Nernst a montré que les lois de la thermodynamique interdisent d'atteindre expérimentalement le zéro absolu. On peut toutefois s'en approcher plus : une température de 0,3 kelvin a été depuis atteinte avec un isotope rare de l'hélium, l'hélium 3, et la désaimantation des noyaux atomiques a produit des températures atteignant 0,00001 kelvin. Kamerlingh Onnes mesure la température avec un thermomètre de l'hélium gazeux : à volume constant et à basse pression, le comportement de l'hélium est très proche de celui d'un gaz parfait. Le produit de la pression par le volume est proportionnel à la température, et la mesure de la pression à volume constant indique la température.

Au cours des trois années suivantes, Kamerlingh Onnes améliore ses appareils pour produire plus d'hélium liquide et l'utilise dans ses travaux. Le transvasement de l'hélium liquide, du récipient où il s'est condensé dans un récipient de stockage, est, par exemple, déjà une performance. Finalement, en 1911, un cryostat à hélium, qui maintient le liquide à basse température, est au point. Outre la vérification et l'amélioration des lois de van der Waals, Kamerlingh Onnes peut alors étudier le

comportement d'autres matériaux aux températures de l'hélium liquide, notamment leur résistance électrique.

En 1911, les physiciens savent que la résistance électrique d'un métal décroît avec la température. Un point, toutefois, est en débat : que se passe-t-il au voisinage du zéro absolu ? Lord Kelvin pense que la circulation des électrons est bloquée, ces derniers étant gelés sur place : la résistance serait donc infiniment grande. Kamerlingh Onnes et Dewar supposent au contraire que la résistance continue de décroître avec la température et qu'elle devient nulle au zéro absolu. Ils avaient raison, mais Kamerlingh Onnes va découvrir que cette décroissance n'est pas continue.

La résistance du mercure

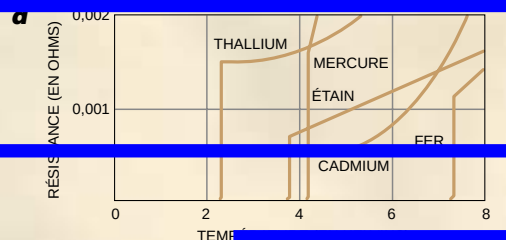
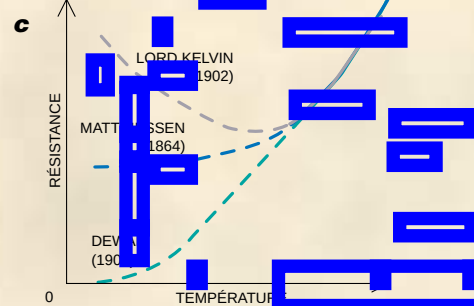
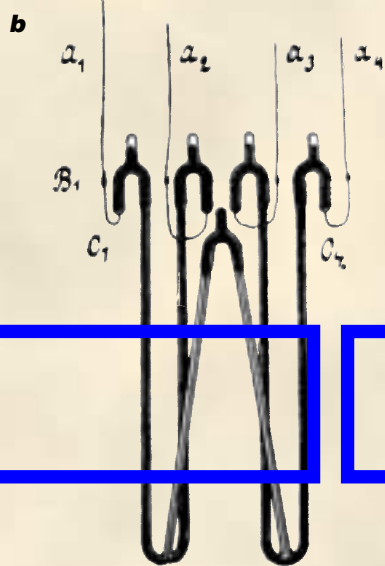
Pour être certain d'observer des phénomènes liés seulement à la structure du métal et non à des impuretés qui y seraient présentes, Kamerlingh Onnes utilise du mercure plusieurs fois distillé à température ambiante, et donc très pur. Le mercure est introduit dans un capillaire de verre en forme de U muni d'électrodes à chaque extrémité, afin que la résistance soit mesurable pour le mercure liquide ou solide.

Kamerlingh Onnes, Gerrit Flim, chef de l'équipe technique, Gilles Holst

et Cornelius Dorsman réalisent les expériences. Kamerlingh Onnes et Flim surveillent l'appareillage cryogénique où le mercure est refroidi ; Holst et Dorsman enregistrent les mesures de résistance avec un galvanomètre, dans une pièce éloignée. Ils observent la décroissance de la résistance électrique, qui suit celle de la température. Toutefois, à la température de l'hélium liquide, nettement supérieure au zéro absolu, la résistance est déjà nulle.

Jacobus de Nobel, arrivé au laboratoire cryogénique de Leyde en 1931, tient d'Flim le récit de ces premières expériences (bien sûr, ce récit de deuxième main, et après si longtemps, est sujet à caution). Lorsqu'ils mesurent une résistance nulle à la température de l'hélium liquide, Kamerlingh Onnes et ses collaborateurs pensent d'abord qu'un court-circuit s'est produit, et ils remplacent le capillaire en U par un tube en W, muni d'électrodes à chaque extrémité et aux angles. Ils mesurent ainsi la résistance de quatre segments. Toutefois, la résistance reste nulle et aucun court-circuit n'est détecté dans aucun segment.

La pression de vapeur d'hélium dans le cryostat doit être maintenue inférieure à la pression atmosphérique pour que l'air s'engouffre par toute fuite éventuelle, y compris la scelle. Toujours selon



3. LE COMPRESSEUR INVENTÉ PAR LOUIS CAILLETET (a), physicien français qui liquéfia l'oxygène et l'azote, fut utilisé par Kamerlingh Onnes. Comme aucun gaz n'est perdu pendant la compression ou la détente, ce dispositif permet de travailler avec des gaz purs et coûteux. Un tube capillaire en forme de W (b) contenait le fil de mercure utilisé dans les mesures de la résistance du mercure

à basse température. Avant que Kamerlingh Onnes ne commence ses recherches, les physiciens prédisaient un comportement des métaux (c) assez différent de ce qu'il observa. Il découvrit qu'une chute abrupte de résistance (d) accompagne la décroissance de la température pour le mercure et pour de nombreux autres métaux.



4. KAMERLINGH ONNES, en 1922, dessiné par son neveu, Harm Kamerlingh Onnes.

Un jour, un étudiant de l'école de fabrication d'instruments qui commande la régulation d'un manomètre relié au liqéfacteur s'endort, et laisse la pression augmenter lentement : la température augmente aussi. Lorsque celle-ci passe à 4,2 kelvins, Holst voit l'aiguille du galvanomètre dévier brusquement : la résistance vient de réapparaître.

Holst a ainsi observé par hasard, pour la première fois, la transition du mercure à l'état que Kamerlingh Onnes nomme alors supraconducteur à l'état de conducteur ordinaire. Ces expériences ont convaincu Kamerlingh Onnes que la résistance du mercure s'annule vers 4,2 kelvins : il publie cette découverte en novembre 1911. Des expériences ultérieures sur l'étain et le plomb montrent que la supraconduction est une propriété de nombreux métaux à très basse température.

En 1915, Kamerlingh Onnes établit, dans une bobine supraconductrice en plomb, un courant permanent qu'il nomme supracourant persistant. La bobine est placée dans un cryostat qui contient de l'hélium liquide, et le courant est induit par un champ magnétique externe. En l'absence de résistance, les électrons circulent indéfiniment dans la bobine. Après avoir observé ce courant, le physicien austro-neerlandais Paul Ehrenfest écrit au prix Nobel de physique Lord Kelvin : « L'action de ces courants "permanents" sur une aiguille magnétique est troublante. Vous sentez de façon presque tangible comment l'anneau d'électrons dans le fil tourne en rond encore et encore – lentement, et sans friction. »

Kamerlingh Onnes meurt en 1926. Une affection des bronches l'obligeait depuis longtemps à de longs séjours de convalescence en Suisse. Son absence physique ne l'empêchait apparemment pas de diriger son équipe. Il aurait même continué après sa mort : son service funéraire ayant duré plus longtemps que prévu, la procession dû courir à travers la ville pour être à l'heure pour l'enterrement dans le petit village voisin de Voorschoten. Alors que le cortège se dépêchait, Flim aurait remarqué : « C'est bien dans les façons du vieil homme – il continue à nous faire courir. »

Kamerlingh Onnes croyait fermement que la supraconduction aurait des applications pratiques. Il avait pourtant découvert qu'un champ magnétique, même très faible, détruit la supraconduction. Dans les métaux qu'il a étudiés, le supracourant est limité à de petites intensités : le champ magnétique associé à un courant d'intensité suffisante empêche la supraconduction. Des matériaux supraconducteurs pour de grandes intensités de courant n'ont été découverts, fabriqués et utilisés dans des appareillages, par exemple pour l'imagerie médicale par résonance magnétique, qu'un demi-siècle après sa mort. Les matériaux supraconducteurs les plus récents permettront peut-être des applications telles que la lévitation magnétique des trains et le transport du courant électrique sans pertes.

Rudolf de BRUYN OUBOTER est professeur de physique expérimentale au Laboratoire Kamerlingh Onnes de Leyde.

Kurt MENDELSSOHN, *The Quest for Absolute Zero : The Meaning of Low-Temperature Physics*, Taylor and Francis, 1977.

Rudolf de BRUYN OUBOTER, *Superconductivity : Discoveries during the Early Years of Low Temperature Research at Leiden. 1908-1914*, in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. Mag-23, n° 2, pp. 355-370, mars 1987.

Bruce CHICHETER, *The Path of No Resistance : The Story of the Revolution in Superconductivity*, Simon & Schuster, 1989.

Gianfranco VIDALI, *Superconductivity : The Next Revolution ?*, Cambridge University Press, 1993.

J. MATRICON et G. WAYSAND, *La guerre du froid*, éditions du Seuil, 1994.

Jacobus de NOBEL, *The Discovery of Superconductivity*, in *Physics Today*, vol. 49, n° 9, pp. 40-42, septembre 1996.

L'UNIVERS DES SCIENCES

L'UNIVERS DES SCIENCES

LES ÉTOILES

Vie et mort des soleils lointains

JAMES KALER



LES ÉTOILES

Cet ouvrage expose l'origine et la nature de nos connaissances sur les étoiles, avant de les décrire dans leur dynamique et leur devenir. Les objets célestes les plus insolites, géantes rouges, supernovae, pulsars et trous noirs, s'inscrivent alors naturellement dans le récit de l'évolution stellaire.

272 pages - 220 F
cod. 1892

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p.98

Des plantes à sang chaud

ROGER SEYMOUR

Certaines fleurs dégagent une grande quantité de chaleur lorsqu'elles fleurissent. Quelques-unes d'entre elles règlent même leur température dans d'étroites limites, comme les animaux à sang chaud.

Au printemps 1972, à Los Angeles, le zoologiste George Bartholomew organisa une soirée pour ses étudiants et ses collègues. Un de ses invités, Daniel Odell, cheminait avec les autres quand il remarqua quelques fleurs spectaculaires. Elles étaient composées d'une structure d'aspect phallique, longue d'une vingtaine de centimètres, qui était partiellement enveloppée d'une structure ressemblant à une feuille. Intrigué, D. Odell en cueillit une pour nous la montrer : la fleur était chaude ! Mieux encore, la température de cette fleur augmenta progressivement, jusqu'à devenir supérieure à celle du corps humain. Les zoologistes que nous étions furent ébahis : comment une simple plante osait-elle atteindre une température supérieure à celle des fleurons de l'évolution, les animaux à sang chaud ?

Depuis ce jour, je suis à la chasse des plantes «à sang chaud» et je les analyse dès que je peux ravir quelques heures à mon programme de recherches sur les animaux. Nous avons notamment découvert quelques plantes capables de produire autant de chaleur par unité de masse que des oiseaux et des insectes en vol,

qui sont pourtant les plus grands producteurs de chaleur. En outre, certaines de ces plantes règlent leur température tout comme le font les oiseaux ou les mammifères ; elles peuvent même ajuster leur production de chaleur et conserver une température aussi constante que possible malgré les fluctuations de la température de l'air.

Nous n'avons pas été les premiers à découvrir que certaines plantes dégagent de la chaleur : en 1778, Jean-Baptiste de Lamarck avait signalé qu'un arum européen (probablement *Arum italicum*) devenait chaud lorsqu'il fleurissait. Cette plante fait

partie de l'immense famille des aracées, qui comprend les philodendrons tels ceux que nous avons observés, l'arum à capuchon (*Arisaema triphyllum*), le cou aux mouffettes et bien d'autres plantes familières. Dans cette famille des arums, la partie florale est nommée spadice ; ce n'est pas une vraie fleur, mais plutôt une «inflorescence», c'est-à-dire une grappe de petites fleurs ou fleurons. Le spadice des arums, avec ses centaines de fleurons regroupés sur une tige commune, est partiellement enveloppé d'une grande bractée, ou feuille spécialisée, nommée spathe.

Après Lamarck, les botanistes ont découvert plusieurs autres aracées et des plantes d'autres groupes qui possèdent également la capacité de s'échauffer : nénuphar de l'Amazonie, goyave, certains palmiers et certaines cycadées. Plusieurs botanistes, tel Bastiaan Meeuse, de l'Université de Washington, ont en partie révélé le mécanisme de la production de la chaleur par les cellules végétales.

Chez les arums, deux voies biochimiques sont simultanément activées dans les mitochondries, qui sont les organites intracellulaires assurant la production d'énergie des cellules. Une de ces deux voies seulement est sensible aux ions cyanure, composés d'un atome de carbone lié à un atome d'azote : elle est commune aux animaux et aux plantes. L'autre voie métabolique, insensible à ce poison, existe chez les plantes productrices de

Philodendron selloum

Température de la fleur :

38 à 46°C

Pour des températures

de l'air comprises

entre 4 et 39 °C

Durée de la période de régulation :

18 à 24 heures

1. ON CONNAÎT TROIS PLANTES qui règlent leur température : *Philodendron selloum*, *Symplocarpus foetidus* (le chou des mouffettes) et *Nelumbo nucifera* (le lotus sacré).

chaleur, chez certaines autres plantes, chez des champignons et chez certains organismes unicellulaires. Dans les deux cas, l'énergie provient de diverses molécules énergétiques et d'oxygène, qui réagissent en formant une molécule riche en énergie nommée ATP (adénosine triphosphate) ; la décomposition ultérieure de celle-ci fournit l'énergie indispensable aux diverses activités cellulaires ou à la production de chaleur. On ignore toutefois si le réchauffement des cellules d'arums s'effectue par synthèse, puis dégradation d'ATP, ou si la chaleur est directement libérée par les voies métaboliques, sans production intermédiaire d'ATP.

Un philodendron à sang chaud

Nous avons d'abord étudié *Philodendron seouloum* d'un tout autre point de vue : au lieu d'examiner des cellules ou des molécules individuelles, comme l'avaient fait la plupart des botanistes, nous avons étudié les inflorescences comme si elles étaient un animal complet. Comme G. Bartholomew et ses collègues de l'Université de Los Angeles effectuaient des études comparatives de la production de chaleur et de la régulation de la

Chou des mouffettes

Température de la fleur : 15 à 22 °C
Pour des températures de l'air comprises entre -15 et 10 °C
Durée de la période de régulation : deux semaines ou plus



température corporelle chez les animaux, nous disposions de toutes les méthodes et de tous les équipements requis. Nous avions également le matériel végétal à portée de main : de nombreux philodendrons étaient en fleur juste sous les fenêtres du laboratoire.

Nous avons d'abord vérifié que les inflorescences devenaient aussi chaudes qu'il nous l'avait semblé lors de la soirée donnée par G. Bartholomew : nous avons planté des sondes dans les spadices et relié celles-ci à un ordinateur qui enregistrait en continu les températures mesurées. Alors que la température de l'air extérieur était en moyenne de 20 °C, celle des spadices était proche de 40 °C!

Comme nous ne maîtrisions pas les variations de température à l'extérieur, nous avons coupé quelques spécimens et les avons placés dans des boîtes climatisées où nous pouvions régler la température. De la sorte, nous pouvions,

en outre, déterminer la production de chaleur par la mesure de la consommation d'oxygène, car ces deux phénomènes sont liés (chez les animaux, la consommation d'un centimètre cube d'oxygène s'accompagne d'une production de chaleur de 20 joules).

Nous avons alors examiné ces inflorescences à des températures variées, inférieures à 0 °C aussi bien que supérieures à 50 °C. Si certaines de ces inflorescences ne parvenaient pas à se réchauffer aux températures les plus basses, leur température atteignait 38 °C quand la température ambiante était seulement de 4 °C. Aux températures ambiantes supérieures à 4 °C, la température des inflorescences coupées continuait d'augmenter, mais avec une différence moindre entre la température ambiante et la température de la plante, la température des inflorescences atteignant 46 °C lorsque la logette climatisée était à la température de 39 °C.

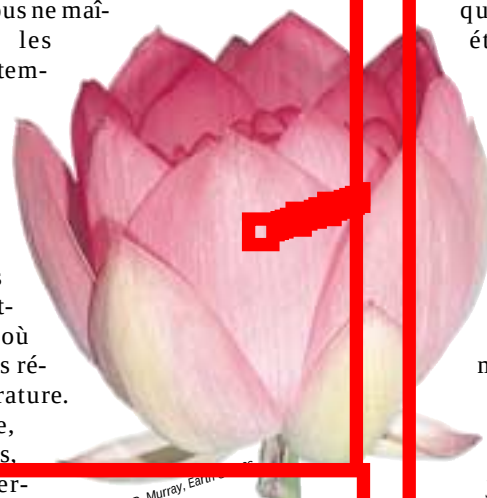
Ainsi les philodendrons peuvent ajuster leur production de chaleur pour maintenir leurs inflorescences au chaud lorsque le temps est froid, mais aussi pour éviter une surchauffe quand il fait déjà chaud. Quelle surprise! Non seulement ces fleurs produisaient de la chaleur, comme les animaux, mais elles assuraient leur régulation thermique, tout comme les animaux à sang chaud tels que les oiseaux et les mammifères.

Deux ans après ces expériences, Roger Knudson, du Collège Luther, dans l'Iowa, signala que le spadice du chou aux mouffettes, *Symplocarpus foetidus*, maintenait sa température entre 15 et 24 °C pendant au moins deux semaines, vers la fin de l'hiver, alors que les températures étaient encore négatives (la plante serait même capable de faire fondre la neige autour d'elle).

Puis, en 1996, Paul Schultz-Motel et moi-même avons découvert que le lotus sacré, *Nelumbo nucifera*, maintient sa température aux alentours de 32 °C pendant deux à quatre jours au milieu de sa

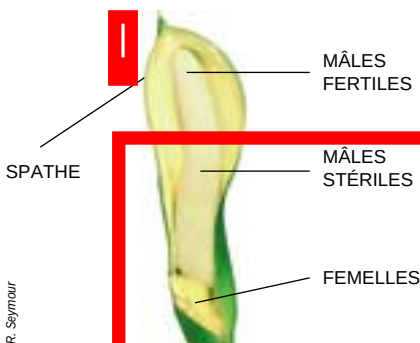
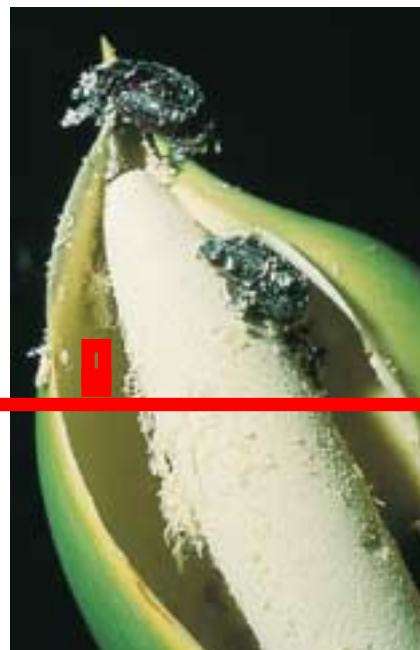
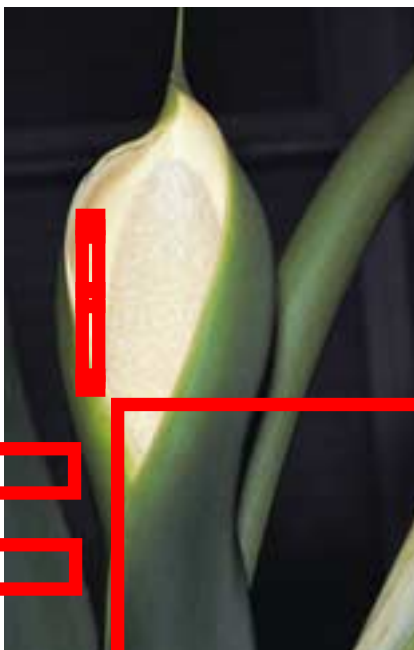
période de floraison estivale, même lorsque la température de l'air est inférieure à 10 °C. Dans ce cas, c'est le réceptacle, la partie centrale de la fleur en forme de cône spongieux, qui produit l'essentiel de la chaleur. Le lotus sacré appartient à une famille botanique différente de celle du philodendron et du chou aux mouffettes, ce qui suggère que le phénomène de régulation thermique a évolué de manière indépendante chez le lotus et chez les arums.

À quoi sert la régulation de la température chez les plantes? Chez les oiseaux et chez les mammifères, la régulation de la température permet aux cellules de



Lotus sacré

Température de la fleur : 30 à 37 °C
Pour des températures de l'air comprises entre 10 et 35 °C
Durée de la période de régulation : deux à quatre jours



DES COLÉOPTÈRES assurent la pollinisation de *Philodendron selloum*. Les inflorescences, ou parties florales, de cette plante sont constituées de trois types de petites fleurs : des fleurons mâles fertiles, des fleurons mâles stériles et des fleurons femelles, qui se développent au bout d'une tige (ci-contre). Au cours de la période pendant laquelle la plante règle la température de son inflorescence, la structure en forme de feuille qui entoure l'inflorescence se replie et se referme, emprisonnant ainsi des coléoptères qui se sont posés sur elle (en haut à gauche). Les coléoptères déposent alors le pollen dont ils sont déjà chargés sur les fleurons femelles ; puis, lorsque la plante se refroidit, la spathe se replie, emprisonnant quelques-uns de ces visiteurs. Plus tard, la spathe se replie partiellement (au centre), et les fleurons mâles libèrent alors leur pollen. L'étroitesse de l'ouverture ainsi ménagée force les coléoptères à ramper à travers le pollen (à droite), où ils se collent sur leur corps alors qu'ils partent vers d'autres inflorescences. Cette coïncidence entre les périodes de réchauffement de la plante et les périodes de reproduction conduit à penser que la régulation thermique de *Philodendron* favorise l'attraction des coléoptères pollinisateurs.

fonctionner à une température optimale, où les réactions biochimiques sont coordonnées et efficaces. Les animaux qui ont le sang chaud et disposent d'une régulation thermique restent actifs et continuent de chercher leur nourriture quand le froid ralentit les réactions cellulaires et l'activité des animaux à sang froid, tels les reptiles. La forte production énergétique des tissus des oiseaux ou des mammifères dont le thermostat est réglé à une température élevée (proche de 40 °C) permet des exercices physiques prolongés, tels la course ou le vol. Pour les plantes, ces descriptions ne valent pas, et une autre explication doit être trouvée.

Les avantages de la régulation

Des botanistes avaient supposé que les arums et certaines autres plantes se chauffaient afin d'évaporer des substances odoriférantes qui auraient attiré des insectes pollinisateurs. Si l'hypo-

thèse explique que ces plantes dégagent de la chaleur, elle ne justifie pas pourquoi cette production de chaleur est augmentée ou diminuée selon la température ambiante. Nous proposons deux autres hypothèses pour expliquer comment certaines espèces de plantes ont progressivement été dotées d'une régulation thermique.

Tout d'abord, les plantes « à sang chaud » pourraient créer un environnement stable et chaud pour des insectes pollinisateurs qui faciliteraient ainsi la reproduction végétale. Chez les gros insectes qui transportent le pollen, le vol, les déplacements et les interactions sociales sont des activités qui nécessitent une température corporelle élevée, laquelle n'est maintenue qu'au prix d'une dépense énergétique importante. Les individus qui visitent des plantes « à sang chaud » profiteraient d'un chauffage directement fourni par la plante ; ils mangeraient, digéreraient, s'accoupleraient et vaqueraient à diverses occupations sans gaspiller leur propre

énergie pour maintenir leur température corporelle. D'autre part, on peut également imaginer que la fleur elle-même ait besoin d'une température constante pour développer ses structures reproductrices ou pour protéger ses parties sensibles des dommages qui résulteraient d'une production de chaleur incontrôlée.

Chacune de ces deux hypothèses explique partiellement pourquoi des plantes règlent leur température. Toutefois les interactions de *Philodendron selloum* et des insectes pollinisateurs sont en faveur de la première solution. Gerhard Gottsberger, de l'Université d'Ulm, a étudié une telle interaction au Brésil, d'où cette plante est originaire.

L'inflorescence de *Philodendron selloum* comporte trois types de fleurons. À la partie supérieure, des fleurons mâles fertiles produisent du pollen ; à la base de l'inflorescence, les fleurons femelles produisent les fruits après fécondation ; entre les fleurons fertiles mâles et femelles, une

bande de fleurs mâles stériles fournit la nourriture aux insectes pollinisateurs et est également la partie de l'inflorescence qui dégage le plus de chaleur rayonnée. La température est réglée pendant une période de 18 à 24 heures qui recouvre la période de réceptivité des fleurs femelles à la pollinisation. Pendant ces quelques heures, la spathe qui entoure le spadice s'ouvre, laissant les insectes pollinisateurs – essentiellement des coléoptères – accéder facilement aux fleurs chauds et stériles, où ils pourront puiser leur nourriture. Le spadice se refroidit ensuite, et la spathe se referme autour de lui, emprisonnant quelques coléoptères. Après une période d'environ 12 heures, une fois que les fleurs femelles ont été pollinisées, la fleur se réchauffe de nouveau et la spathe s'écarte partiellement. Les fleurs fertiles mâles libèrent alors leur pollen, qui vient se coller sur les

insectes ; les derniers s'échappent et vont alors répéter ce cycle sur d'autres inflorescences. Un tel mécanisme favorise la pollinisation croisée et évite l'autofécondation, augmentant la diversité génétique de l'espèce et améliorant le succès de la reproduction.

Tout comme *Philodendron selloum*, le lotus sacré maintient des températures élevées lorsque les stigmates femelles sont humides et réceptifs, avant que le pollen ne soit libéré. Le réchauffement commence avant l'ouverture totale des pétales et se termine une fois que la fleur a complètement éclos. Si la forme de cette fleur favorise également la pollinisation par les coléoptères, on ignore encore si la régulation thermique a évolué uniquement pour aider les coléoptères dans leur entreprise. En effet, on ignore l'habitat initial de cette plante et, de ce fait, on ignore si les coléoptères sont ses principaux pollinisateurs dans cette région. En outre, la pollinisation de la fleur n'est pas exclusivement fondée sur les coléoptères : une fois que les pétales se sont entièrement ouverts et que la production de chaleur décroît, d'autres insectes peuvent faire leur office.

teurs dans cette région. En outre, la pollinisation de la fleur n'est pas exclusivement fondée sur les coléoptères : une fois que les pétales se sont entièrement ouverts et que la production de chaleur décroît, d'autres insectes peuvent faire leur office.

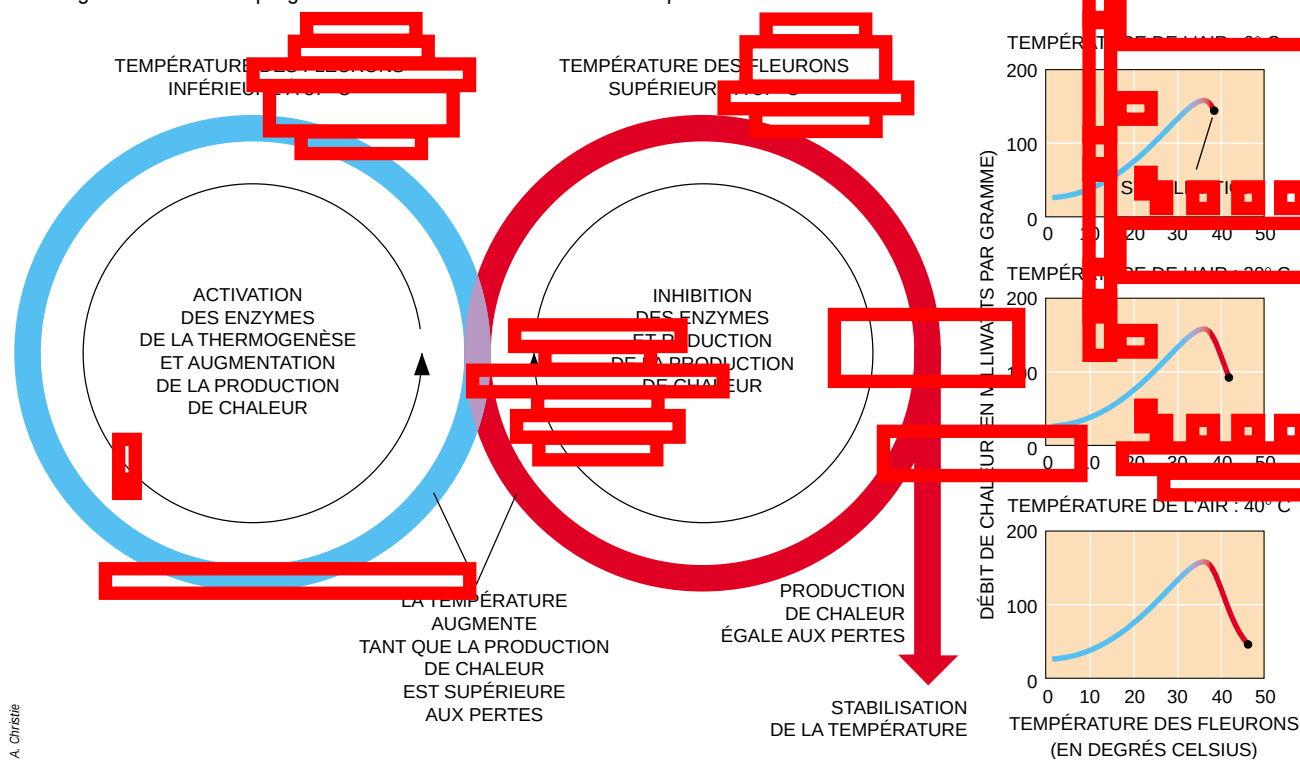
Comment fonctionne le philodendron

En matière de régulation thermique des plantes, la question du comment est aussi fascinante que celle du pourquoi ; c'est d'ailleurs le comment qui m'a le plus intéressé, quand j'ai commencé à étudier sérieusement les philodendrons. Pour aborder ce problème, j'ai commencé à travailler avec G. Bartholomew et Christopher Barnhart, au début des années 1980 ; la réponse était loin d'être évidente, car les plantes fonctionnent très différemment des animaux.

Comment *Philodendron* stabilise sa température

Les inflorescences de *Philodendron selloum* stabilisent leur température grâce au thermostat de leur fleurs mâles stériles réglé à 37 °C (diagramme). Quand la température des fleurs devient inférieure à cette température, les fleurs augmentent leur production de chaleur (cycle de gauche). Tant que la production de chaleur est supérieure aux pertes, la température des fleurs augmente. Quand la température des fleurs est supérieure à 37 °C (cycle de droite), les enzymes nécessaires à la thermogenèse s'inactivent progressivement. Cette inhibition conduit

à une diminution de la thermogenèse qui se poursuit jusqu'à ce que la quantité de chaleur dégagée soit égale à la quantité de chaleur perdue. La température finale des fleurs s'équilibre à la température ambiante (courbes à droite) ; quand l'air est frais, les fleurs perdent rapidement la chaleur, de sorte qu'ils la produisent rapidement, et leur température se stabilise vers 37 °C. Quand la température ambiante est élevée, les fleurs perdent moins de chaleur, de sorte qu'ils en produisent moins, jusqu'à ce que leur température se stabilise vers 46 °C.



Chez les derniers, la régulation thermique est complexe : elle nécessite la présence de capteurs de température dispersés sur tout le corps, et un système nerveux qui intègre toutes les informations et qui envoie ensuite les commandes indispensables aux diverses parties du corps pour qu'elles modifient leur température. Par exemple, le système nerveux commande le gonflement des plumes ou le hérissément des poils, en réaction à un refroidissement : ainsi l'organisme augmente l'isolation thermique et réduit les pertes de chaleur. Comme cette stratégie a des limites, les animaux doivent également augmenter leur production de chaleur lorsque leur environnement devient trop froid : ils frissonnent alors, faisant ainsi fonctionner leurs muscles pour leur faire consommer de l'ATP ; simultanément le rythme respiratoire et la vitesse de circulation du sang augmentent pour accélérer l'apport des substances nutritives et de l'oxygène aux tissus producteurs de chaleur.

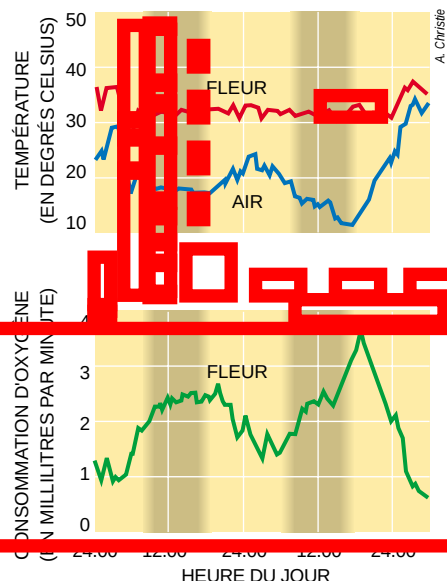
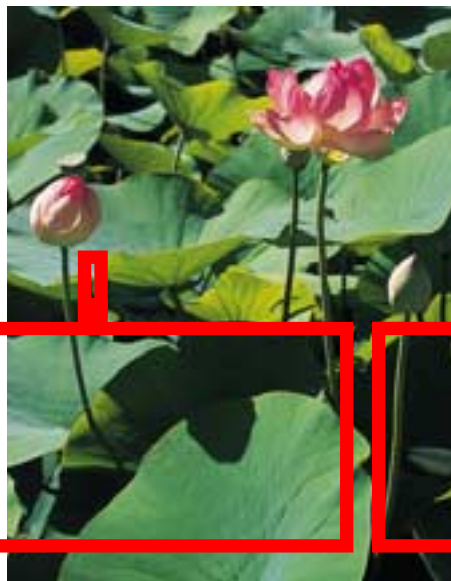
Toutefois les plantes n'ont ni fourrure, ni plumes, ni système nerveux, ni muscles, ni poumons, ni sang, ni cerveau. Comment le philodendron se réchauffait-il ou se refroidissait-il, alors, dans une gamme de températures comprise entre 38 et 46 °C ?

Nous avons d'abord cherché quelle partie de l'inflorescence produisait la chaleur : nous avons séparé les fleurons des divers types de la tige qui les porte et avons mesuré la consommation d'oxygène pour chaque type. Ces mesures ont révélé que les fleurons mâles stériles étaient ceux qui consommaient la plus grande partie de l'oxygène fourni ; les fleurons mâles fertiles en consommaient un peu, et les fleurons femelles, comme la tige, quasiment pas. Des études ultérieures confirmèrent que les fleurons mâles stériles assurent la régulation thermique de l'inflorescence et montrèrent que les fleurons peuvent très bien se passer des systèmes complexes de régulation de la température dont disposent les animaux car ils contiennent leurs propres thermostats, leurs propres sources d'approvisionnement en nourriture et leur propre dispositif de captation de l'oxygène.

Pour démontrer l'existence des thermostats, nous avons enlevé les fleurons mâles stériles du spadice et avons placé ces fleurons isolés dans des incubateurs réglés à des températures fixes. Livrés à eux-mêmes, les fleurons n'interagissaient plus, de sorte que nous pouvions déterminer quelle la quantité de chaleur ils produisaient.

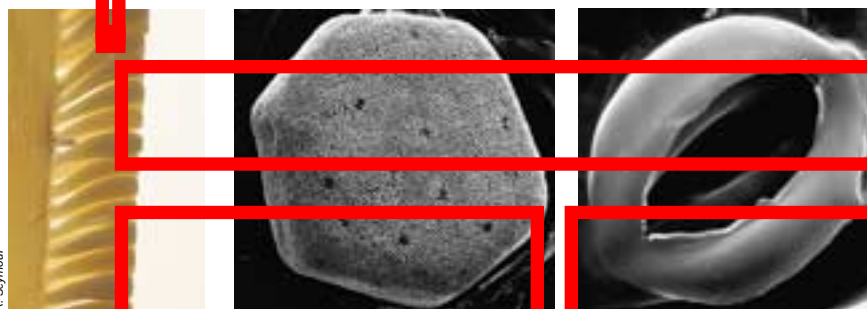
Les fleurons isolés dégageaient peu de chaleur lorsqu'ils étaient placés à une température proche de 0 °C, vraisemblablement parce que leurs enzymes nécessaires à la production de chaleur fonctionnent lentement à basse température. En revanche, à température supérieure, la production de chaleur variait, en fonction de la température ambiante, comme sur le spadice intact, où les fleurons gagnent quelques degrés supplémentaires en raison de la chaleur dégagée par leurs voisins. A mesure que les fleurons s'échauffent, leur vitesse de production de chaleur augmente, ce qui les réchauffe davantage : cette amplification a lieu jusqu'à ce que la température des fleurons atteigne 37 °C. Aux températures supérieures, les fleurons réduisent brusquement leur production de chaleur.

Ainsi les conditions environnementales déterminent l'amplitude de cette diminution. Si la température de l'air est voisine de 4 °C, les fleurons perdent rapidement leur chaleur, et leur température se stabilise vers 38 °C. Avec une production intense de chaleur, en revanche, sur un environnement très chaud, par exemple à 39 °C, leur perte calorifique est ralentie et leur température se stabilise vers 46 °C (à cette production de cha-



3. TOUS LES STADES DE LA FLORAISON du lotus sacré sont visibles sur la photographie centrale. La régulation de la température commence entre la formation du bouton (à droite du centre de la photographie) et l'épanouissement des pétales (à gauche), quand les insectes pénètrent dans la fleur. Elle se termine lorsque les pétales s'épanouissent entièrement (en haut). Après la pollinisation, les pétales tombent, et le réceptacle, qui contient les graines, commence à se développer. Ce réceptacle, la structure spongieuse jaune visible sur la coupe transversale de

la fleur (à gauche), est le principal organe générateur de chaleur. Les graphiques, qui indiquent la température de l'une des fleurs, montre comment le lotus sacré commande sa température. En effet, la température de sa fleur reste quasi constante (courbe supérieure) malgré les importantes variations de la température ambiante. De même, la fleur parvient à assurer une régulation en augmentant sa consommation d'oxygène (et, par conséquent, sa production de chaleur) lorsque l'air est froid et la réduit lorsque l'air se réchauffe (courbe inférieure).



4. LES FLEURONS STÉRILES du *Philodendron selloum* (à gauche) laissent pénétrer l'oxygène par des pores appelés stomates. Plusieurs stomates (taches sombres) sont visibles sur la micrographie de gauche, qui montre la pointe d'un fleuron. La micrographie de droite est un agrandissement d'un stomate isolé.

leur réduction). Le comportement thermique des fleurons est réversible : un fleuron qui a réduit sa production de chaleur aux heures chaudes du jour reprend celle-ci lorsque la température diminue, la nuit venue.

Apparemment la production de chaleur diminue d'elle-même dans les fleurons déjà chauds, parce que la température élevée inhibe les voies métaboliques responsables de la production de chaleur. On ignore encore si la chaleur agit directement sur les enzymes qui gouvernent ces voies de production, ou indirectement, en perturbant la structure des membranes sur lesquelles se fixent ces enzymes.

Un rendement record

Ayant déterminé comment le thermostat des fleurons réglait la production de chaleur, nous avons cherché comment les fleurons obtiennent l'oxygène et les substances nutritives nécessaires à la production de chaleur, et quelle quantité de chaleur ils produisent. Nos études antérieures avaient donné une estimation de la quantité de chaleur produite sur la base de la consommation d'oxygène, mais nous avons confirmé que toute l'énergie investie dans le réchauffement de l'inflorescence de *Philodendron selloum* est présente dans les fleurons (pour d'autres plantes capables de régulation thermique, tel le chou aux mouffettes, le combustible est importé de la racine). Puis nous avons constaté que les fleurs « brûlent des graisses plutôt que des sucres comme le font les autres arums : les observations au microscope électronique des fleurons mâles ont révélé que leurs tissus contiennent des gouttelettes de matière grasse et de nombreuses mitochondries ; ainsi leur

structure ressemble remarquablement à celle du tissu adipeux brun, un tissu des mammifères qui est spécialisé dans la production de chaleur (dans l'espèce humaine, ce tissu n'est abondant que chez le nouveau-né). Les animaux comme les plantes utilisent généralement les mitochondries pour convertir en ATP la majeure partie de l'énergie qu'ils dérivent des substances nutritives ; mais, comme la graisse brune, l'inflorescence de *Philodendron selloum* utilise directement les nutriments et l'oxygène pour produire de la chaleur.

La thermogénèse de *Philodendron selloum* a un rendement énergétique exceptionnel : un spadice de 125 grammes produit environ neuf watts pour maintenir l'inflorescence à 40 °C à une température ambiante de 10 °C, soit la même puissance que celle rayonnée par un chat de trois kilogrammes, placé dans les mêmes conditions. Un rat pesant 125 grammes ne rayonne que deux watts, parce que, bien isolé par sa fourrure, il perd moins de chaleur et peut consacrer son énergie à d'autres fonctions.

Rapportée à la masse de l'organe, la production de chaleur par les fleurons de *Philodendron selloum* rapproche ces derniers des oiseaux et des insectes volants : avec une masse de huit milligrammes, ils fournissent 0,16 watt par gramme de tissu, contre 0,2 à 0,7 watt par gramme chez les oiseaux et les insectes volants. D'autres arums sont encore plus efficaces : *Arum maculatum* produit 0,4 watt par gramme de fleurons, soit à peine moins que la puissance de un watt par gramme produite par le tissu adipeux brun du hamster de Sibérie, ou de 2,4 watts par gramme des muscles du vol chez l'abeille, champion de la thermogénèse animale.

MUSCLE DU VOL DE L'ABEILLE

TISSU ADIPEUX BRUN
DU HAMSTER

0,1

ARUM

0,237

COURBIL

0,16

FLEURON DU PHILODENDRON

0,016

RAT DE 125 GRAMMES À 10 °C

Pour rayonner autant, *Philodendron selloum* doit s'approvisionner en oxygène : c'est un problème technique intéressant, car la plante n'a ni poumon, ni système circulatoire, ni régulation hormonale. Nous avons montré que les fleurons puisent l'oxygène par simple diffusion de l'air, qui en contient environ 21 pour cent. Comme la concentration en oxygène à l'intérieur des fleurons est inférieure à celle de l'air, l'oxygène diffuse des zones à forte concentration vers les zones à faible concentration. Nos expériences ont montré que la diffusion de l'oxygène ne ralentit que lorsque la concentration en oxygène, dans la couche d'air qui entoure le fleuron, devient inférieure à 17 pour cent. Cependant, en pratique, une telle concentration n'est jamais atteinte, même lorsque les fleurons ont une production maximale de chaleur.

Nos études anatomiques récentes ont indiqué comment l'oxygène pénètre dans les fleurons. Chacun d'eux mesure environ sept millimètres de long et 2 millimètre d'épaisseur

(soit environ la taille d'un grain de riz). L'oxygène s'introduit par quelque 170 pores ou stomates, puis se répartit dans un réseau de cavités interstitielles qui occupe moins d'un pour cent du volume du fleuron. La distance de diffusion, entre la surface du fleuron et chacune des cellules, est un peu inférieure à 0,75 millimètre, ce qui est remarquablement proche de la longueur des canaux tubulaires remplis d'air qui assurent l'approvisionnement en oxygène des muscles de vol des insectes.

Nos travaux sur les plantes «à sang chaud» sont une excellente démonstration de l'intérêt de la pluridisciplinarité. Poussés par la curiosité, nous avons jeté un regard neuf sur des phénomènes inhabituels, sans être bloqués par les préjugés qui canalisent souvent la recherche. Sortant des sentiers battus, nous avons mis en évidence des ressemblances remarquables entre les animaux et les plantes de deux catégories d'organismes qui semblent n'avoir pas grand-chose en commun.

Roger SEYMOUR est professeur de zoologie à l'Université d'Adélaïde.

R.S. SEYMOUR, G.H. BARTHOLOMEW et M.C. BARNHART, *Respiration and Heat Production by the Inflorescence of Philodendron selloum*, in *Planta*, vol. 157, n° 4, pp. 336-343, avril 1983.

R.S. SEYMOUR, M.C. BARNHART et G.A. BARTHOLOMEW, *Respiratory Gas Exchange during Thermogenesis in Philodendron selloum Koch*, in *Planta*, vol. 161, n° 3, pp. 229-232, juin 1984.

B.J.D. MEESSE et I. RASKIN, *Sexual Reproduction in the Arum Lily Family, with Emphasis on Thermogenicity*, in *Sexual Plant Reproduction*, vol. 1, n° 1, pp. 2-15, mars 1988.

R.S. SEYMOUR, *Analysis of Heat Production in a Thermogenic Arum Lily, Philodendron selloum, by Three Calorimetric Methods*, in *Thermochimica Acta*, vol. 193, pp. 91-97, 14 décembre 1991.

R.S. SEYMOUR et P. SCHULTZE-MOTEL, *Thermoregulating Lotus Flowers*, in *Nature*, vol. 383, p. 305, 26 septembre 1996.

La ressemblance mathématisée

JEAN-PAUL DELAHAYE

Être intelligent c'est voir des ressemblances, mais qu'est-ce qu'une ressemblance ?

Que la tête de Louis Philippe ressemble à une poire, c'est ce que les caricatures ont montré. Que la carte de l'Italie ressemble à une botte, cela saute aux yeux. Que le bruit de la grosse caisse ressemble au tonnerre, le compositeur le sait et l'utilise. Que l'histoire de *La bicyclette bleue* ressemble à celle d'*Autant en emporte le vent*, c'est ce que les juges ont dû évaluer. La reconnaissance de la ressemblance est essentielle à notre survie : sans une notion instinctive de « situation équivalente », sans une maîtrise des « visages semblables », des « animaux de la même espèce », etc., nous ne pourrions nous orienter, nous reconnaître, identifier les aliments comestibles, les bêtes dangereuses.

La difficulté est que la même eau ne coule jamais deux fois sous le pont : deux situations ne sont jamais identiques en tout point, jamais deux animaux ne sont exactement pareils, jamais le visage de nos connaissances ne présente le même aspect à deux instants différents, etc.

Nous savons pourtant juger que deux situations, deux objets, deux images sont analogues, et cette capacité est une composante essentielle de l'intelligence. L'un des problèmes majeurs de l'Intelligence

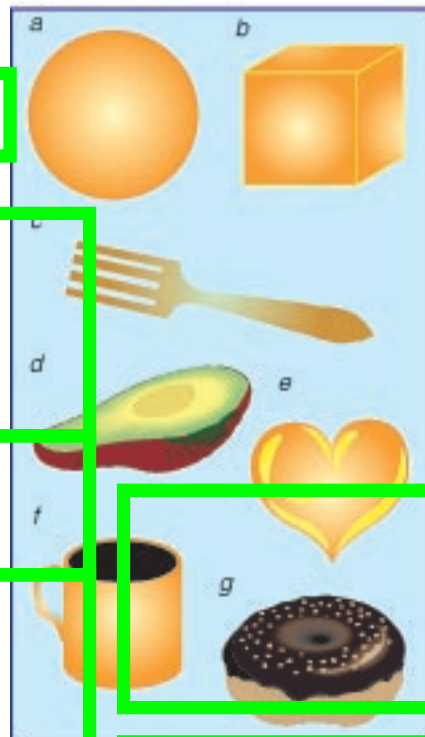
artificielle est de confectionner des programmes qui, au moins partiellement, reconnaissent des objets approchants. Le problème est difficile (et tout progrès en Intelligence artificielle est difficile), mais faut-il pour cela renoncer à le résoudre et penser qu'il est définitivement hors de portée ?

Les mathématiques qui prétendent fournir les outils pour comprendre le monde et modéliser, le maîtriser proposent-elles de bonnes théories de la ressemblance ?

Nous verrons que oui en examinant plusieurs de ces théories. La dernière d'entre elles a été développée récemment par un groupe de physiciens, de mathématiciens et d'informaticiens : elle est fascinante par les liens qu'elle établit avec la thermodynamique et parce qu'on peut la considérer comme la théorie ultime de la ressemblance.

LES SEMBLABLES GÉOMÉTRIQUE ET TOPOLOGIQUE

L'idée mathématique la plus ancienne est celle de semblable géométrique : deux objets sont semblables si, en leur faisant effectuer des translations, des rotations, des symétries et des homo-



2. La surface d'un ballon peut se déformer continûment et prendre la forme d'un cube, d'un dé, d'un cœur, d'un œuf, ou même d'une fourchette. Ces objets sont topologiquement semblables et pourtant, il est inacceptable de les considérer « semblables ». La tasse et le gâteau torique sont topologiquement équivalents entre eux mais pas à eux-mêmes.

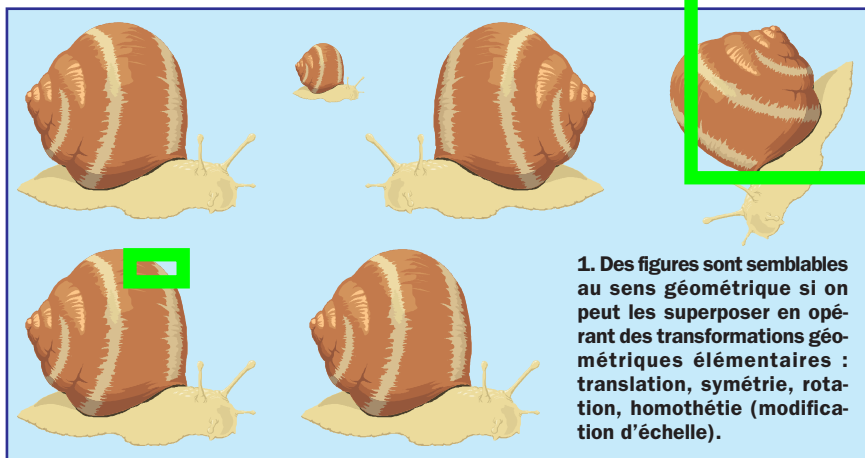
théties (agrandissements et rapetissements linéaires proportionnés), on peut les superposer.

Cette notion de figures géométriques semblables est utile pour faire des plans de voitures ou de maisons, mais elle est trop limitée, car trop rigide. Ce n'est pas elle qui pourra, par exemple, nous indiquer si deux photographies différentes représentent le même visage. Les mathématiciens conscients de cette limite, ont proposé une notion bien plus souple de ressemblance : l'homéomorphie.

Deux surfaces sont homéomorphes si, en imaginant qu'elles sont fabriquées avec un caoutchouc parfait, on peut déformer l'une en l'autre sans faire de déchirure. Cette fois, la notion de ressemblance obtenue est trop molle ! La surface d'un cube est topologiquement semblable à celle d'un ballon ou même

d'une fourchette. La ressemblance topologique conduit d'ailleurs à des situations paradoxales : un système d'anneaux enlacés est transformable progressivement en le même système d'anneaux libérés. Bien d'autres notions de topologie généralisent et étendent celle d'homéomorphisme, mais chacune ne saisit qu'une part bien mince de l'idée d'analogie.

Une raison en est sans doute que,



1. Des figures sont semblables au sens géométrique si on peut les superposer en opérant des transformations géométriques élémentaires : translation, symétrie, rotation, homothétie (modification d'échelle).

pour traiter des figures semblables, il faut renoncer à donner une réponse binaire NON et confectionner une réponse de ressemblance. Cette évaluation numérique va être donc par là même un appel à des distances : deux objets identiques seront à distance nulle ; deux objets très semblables seront à petite distance l'un de l'autre ; la distance entre deux objets très différents sera grande.

LA DISTANCE DE HAUSDORFF

Une première distance satisfaisante dans un assez grand nombre de cas est la distance de Hausdorff, nommée ainsi pour honorer Felix Hausdorff, mathématicien allemand mort en 1942. En 1914, Hausdorff a formulé les axiomes généraux de la topologie.

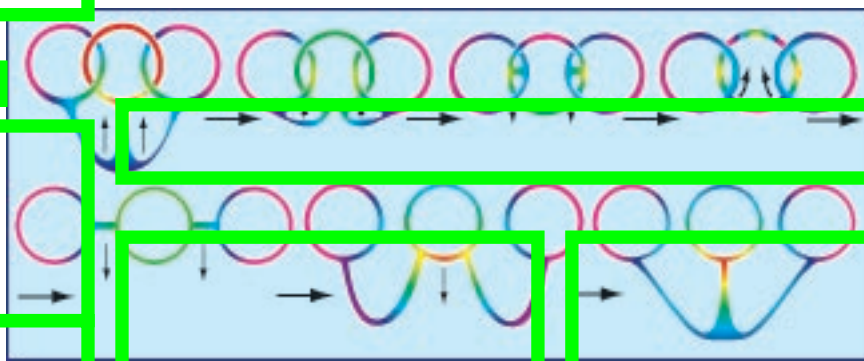
La distance de Hausdorff mesure la distance entre objets dessinés en noir et blanc sur une feuille de papier (des généralisations aux espaces à trois dimensions ou plus, ou prenant en compte les couleurs sont possibles). Pour définir cette distance entre figures, on utilise la notion usuelle de distance entre deux points.

Par définition, deux objets A et B dessinés sur une feuille de papier (c'est-à-dire deux ensembles de points A et B) sont à une distance de Hausdorff l'un de l'autre de moins de r unités, si chaque point de A est à moins de r unités d'au moins un point de B , et si, réciproquement, chaque point de B est distant de moins de r unités d'au moins un point de A .

Un procédé simple permet de visualiser ce qu'est la distance de Hausdorff entre deux ensembles A et B : on remplace chaque point de l'ensemble A par une petite tache ronde dont on fait grossir le rayon jusqu'à ce que B soit recouvert par ces « A gonflés». On imagine aussi le processus réciproque (le recouvrement de A par un « B gonflé»). La distance de Hausdorff entre A et B est le plus petit r permettant simultanément les deux recouvrements.

Cette distance saisit correctement de nombreux aspects de l'idée intuitive de ressemblance. On considérera que deux dessins ne différant que par l'épaisseur des traits, ou par le fait que l'un est dessiné en pointillé, sont très proches l'un de l'autre : dès que l'on fait un peu gonfler l'un, il recouvre l'autre.

De même, la version brouillée d'un dessin A à travers un miroir dépoli sera peu distante du dessin A : de même encore, si, dans un dessin, vous remplacez les zones noires par des zones finement hachurées ou par des zones emplies de points aléatoires, alors la distance de la figure initiale à sa transformée sera petite.



3. Les transformations continues des surfaces réalisées en caoutchouc idéal permettent de passer d'une forme enlacée à une autre désenlacée, et «apparemment» sans rapport. Le semblance topologique apparaît trop tolérante.

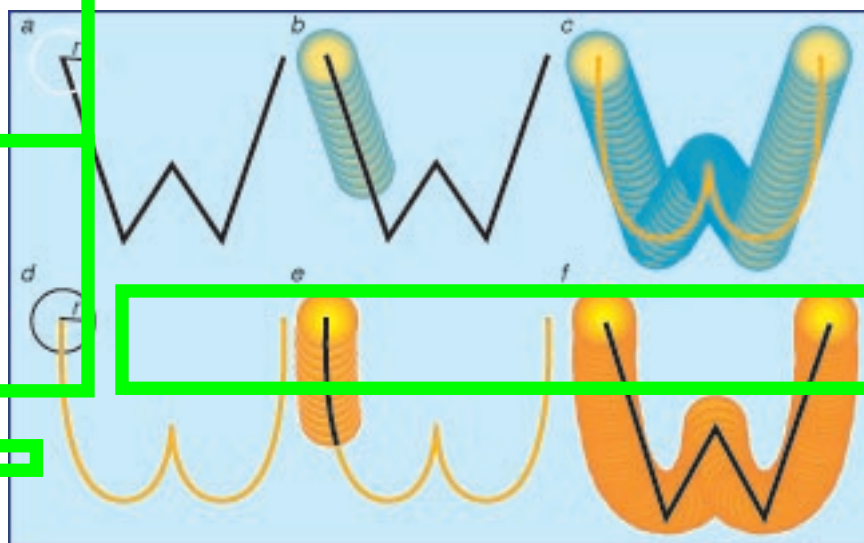
Un disque et une ellipse peu aplatis sont très comparables : seront proches pour la distance de Hausdorff. Un carré et un cercle, en revanche, seront plus éloignés. De façon générale, changer la texture ou déplacer légèrement les points d'un dessin en en préservant l'allure générale produit un dessin proche pour la distance de Hausdorff, alors que changer les formes crée des dessins éloignés.

Un cas intéressant est celui de l'approximation finie d'ensembles infinis. Un dessin comportant un nombre infini de points – par exemple, un disque plein – peut être approché de plus en plus finement par une série de figures ayant chacune un nombre fini de points. Ici l'infini, même non dénombrable, se laisse approcher facilement par du fini.

Cette distance est d'ailleurs implicitement utilisée par tous ceux qui dessinent des fractales : jamais personne ne dessine vraiment une fractale,

celle-ci étant, par définition, infiniment décomposable : ce qu'aucun écran, aucun crayon, aucune imprimante ne réussit jamais à reproduire (notons aussi que personne ne dessine non plus de vrais cercles ou de vraies lignes). En revanche, les représentations qu'on donne des fractales sont bien des objets proches au sens de la distance de Hausdorff : comme Monsieur Jourdain faisait de la prose sans le savoir, nous utilisons la notion de ressemblance à la manière de Hausdorff sans jamais en avoir entendu parler.

Puisque deux dessins proches au sens intuitif sont mesurés proches au sens de la distance de Hausdorff, on comprend pourquoi cette distance est un outil essentiel de la morphologie mathématique, la discipline dont le but est la compréhension et l'analyse des images et des formes, et dont les applications concernent la vision artificielle, le traitement informatisé des images, la biologie et la géologie.



4. La distance de Hausdorff est le rayon r le plus petit tel qu'en remplaçant chaque point de A par un disque de rayon r on recouvre B , et inversement. C'est une vraie distance : $d(A,A) = 0$, $d(A,B) = d(B,A)$, $d(A,C) \leq d(A,B) + d(B,C)$ lorsque A , B et C sont des ensembles non vides et fermés (X est fermé si toute suite convergente de points de X a sa limite dans X).

INSUFFISANCE DE LA DISTANCE DE HAUSDORFF

Pourtant la distance de Hausdorff ne reconnaît pas certaines proximités entre formes que l'esprit humain identifie instinctivement. Ainsi la distance de Hausdorff entre un dessin et sa version en négatif (où sa version où seul le contour des formes est gardé) est grande, alors que bien sûr nous, nous voyons très rapidement que le même objet est représenté. Pire, ajoutant un unique point *exté-*rieur d'un dessin donne un dessin très éloigné pour la distance de Hausdorff, alors que les deux objets nous apparaissent presque identiques. De même encore, la distance entre un objet et le même objet répété d'un facteur constant est grande alors que nous percevons presque instantanément leur structure commune.

De même encore, la distance de Hausdorff ne permet pas de reconnaître la similitude entre des images d'un objet tridimensionnel (un visage, par exemple) vu sous divers angles ou des éclairages différents, alors que notre cerveau perçoit très vite l'analogie des formes.

Un défaut mineur, mais à signaler aussi de la distance de Hausdorff est qu'elle ne donne rien de bon avec des objets infinis en taille. Deux droites passant par un même point, ou bien sont confondues (et alors distance de 0 (ce qui est satisfaisant), ou bien sont distantes de $+\infty$ même si leur angle est très faible (ce qui n'est pas acceptable).

Les déformations «caoutchouteuses» ne sont pas bien mesurées non plus : les montres molles de Dali ne sont pas proches des vraies montres pour la distance de Hausdorff, alors que, pour nous, elles le sont.

Remarquons qu'une combinaison de la notion de distance de Hausdorff avec la notion de similitude géométrique arrange certains de ces défauts : pour mesurer la distance entre *A* et *B* avec cette distance (appelée Hausdorff-bis), on envisage toutes les figures obtenues par application d'une similitude géométrique à *B* et l'on regarde celle qui, au sens de la distance de Hausdorff, est la plus proche de *A*, c'est elle alors qui détermine la distance entre *A* et *B* pour Hausdorff-bis. Cette variante corrige les défauts concernant les déformations d'échelle et les déplacements, mais ne change rien aux insuffisances de la distance de Hausdorff concernant le passage au négatif, l'ajout d'un point à l'extérieur, les photos d'un même visage ou les déformations caoutchouteuses.

La dernière notion de ressemblance correspond à un progrès important sur le plan théorique, et en même temps

ouvre la porte à certaines applications pratiques. Cette notion, que nous appellerons distance informationnelle, est le résultat du travail commun de cinq chercheurs provenant de disciplines différentes : les physiciens Wojciech Zurek, du Santa Fe Institute, et Shmuel Eliezer Yedid, du Centre de recherches IBM à New York, le mathématicien Peter Gacs, de l'Université de Boston, aux États-Unis, et les informaticiens Ming Li, de l'Université de Waterloo, au Canada, et Paul Vitanyi, de l'Université d'Amsterdam.

LA DISTANCE INFORMATIONNELLE

La distance informationnelle présuppose que tous les objets que l'on considère sont des ensembles finis de points pris dans un ensemble discret. Il faut par exemple imaginer qu'il s'agit des pixels (noirs ou blancs) d'une image. Pour la distance de Hausdorff, une telle hypothèse de finitude n'était pas nécessaire : pour définir un concept, on se voit parfois obligé de renoncer à l'infini, ce qui n'est peut-être pas étonnant : selon certains philosophes des mathématiques, l'infini n'est qu'une illusion. Des généralisations de la distance informationnelle à plus de deux dimensions et prenant en compte les couleurs sont possibles, mais nous ne les examinerons pas ici.

L'idée fondamentale est que, si deux objets sont semblables, on passe facilement de la description de l'un à la description de l'autre, et réciproquement. En revanche, plus le passage de l'une à l'autre est long à détailler, plus les objets doivent être considérés comme différents, c'est-à-dire éloignés.

La difficulté du passage d'une description de l'objet *A* à la description de l'objet *B* est mesurée par la longueur du plus court programme qui transforme la donnée des points de *A* (supposés fournis par un ordinateur) à la donnée des points de *B*. Et donc la distance informationnelle est la somme des longueurs du plus court programme permettant de transformer *A* en *B*, et du plus court programme permettant de transformer *B* en *A*. On montre que cette distance varie peu quand on change le langage de programmation utilisé pour mesurer la taille des programmes.

L'idée d'utiliser une notion de plus court programme provient de la théorie algorithmique de l'information (appelée aussi théorie de la complexité de Kolmogorov), où l'on mesure la complexité d'un objet *A* par la taille du plus court programme qui produit *A*. La théorie de la distance informationnelle utilise d'ailleurs

de nombreux résultats de la théorie algorithmique de l'information.

Pour illustrer la notion de distance informationnelle, considérons le dessin de la tour Eiffel et le même dessin en négatif (nous avons dit que la distance entre ces deux objets pour la distance de Hausdorff est grande). Ces deux objets sont très proches pour la distance informationnelle ?

Où ça on écrit facilement un programme de «passage au négatif» et que ce programme est court. Le plus court programme transformant le premier dessin en le second (qui est le même que celui transformant le second en le premier) sera encore plus court (notons qu'il n'est pas indispensable de connaître précisément le plus court programme), et donc les deux dessins seront proches au sens de la distance informationnelle.

Ajouter un point à l'objet *A* donne un objet *B* que notre cerveau considère proche de *A* d'accord avec cette perception (et contrairement encore à la distance de Hausdorff, qui se trompait dans un tel cas) la distance informationnelle trouve que *A* et *B* sont très proches, car le programme le plus court ajoutant un point, et le programme le plus court enlevant un point (pour passer de *B* à *A*) sont tous les deux très courts.

Plus remarquable et plus intéressant est l'exemple suivant : si l'on considère une image de la tour Eiffel prise selon un autre angle de vue, alors la similitude on pourra par l'utilisation d'un programme assez court (qui contiendra des informations sur la position tridimensionnelle de la tour Eiffel) passer d'une image à l'autre. La parenté entre deux images provenant d'un même objet pris sous différents angles, ou même sous différents éclairages est correctement détectée par la distance informationnelle.

Si l'on considère deux textes, même très longs, le second étant le résultat d'une remise en page du premier (changement des polices de caractères, des sauts des lignes, etc.), ils seront proches pour la distance informationnelle, car le passage de l'un à l'autre est décrit – et donc programmé –, de manière concise.

De nombreux autres exemples prouvent que cette mesure de distance fondée sur la taille des programmes satisfait l'essentiel de nos attentes, et que la grande majorité des défauts de la distance de Hausdorff disparaissent avec la distance informationnelle. L'utilisation pratique de cette distance semble cependant poser de graves problèmes.

Peut-on mesurer facilement la distance informationnelle entre objets ? Malheureusement, non. On majore sans mal

la distance informationnelle entre objets : à chaque fois que nous cherchons un programme qui transforme A en B et B en A , on en déduit une telle majoration. En revanche, trouver des programmes dont on puisse prouver qu'ils sont les plus courts possibles est exceptionnel, et donc mesurer la distance informationnelle exactement est très rare.

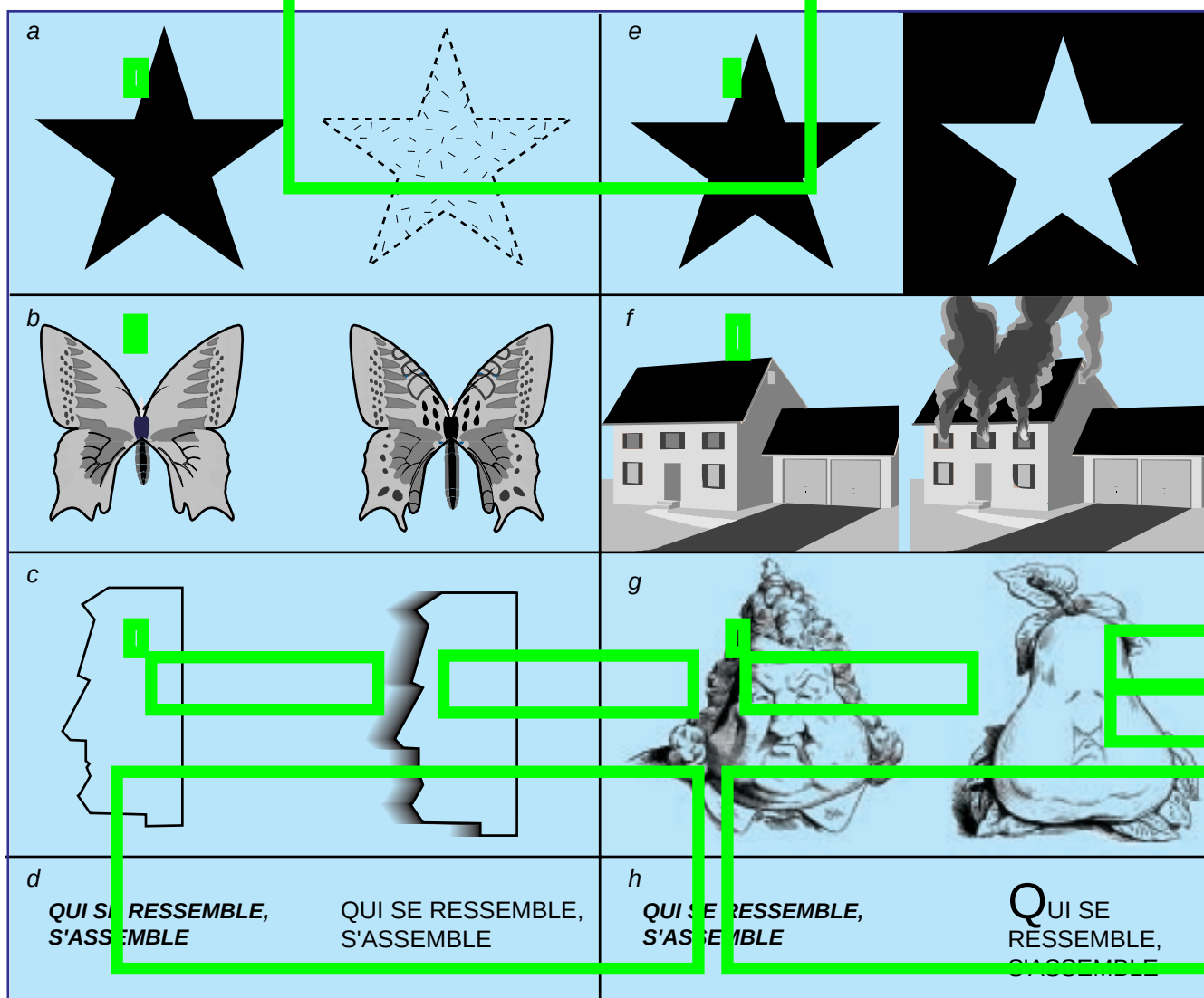
DISTANCE INFORMATIONNELLE ET INDÉCIDABILITÉ

Cette difficulté pratique est liée à l'indécidabilité logique dont le problème de l'arrêt des programmes proposé en 1936 par Alan Turing a été le premier

exemple. Le résultat de Turing nous dit que jamais on ne pourra faire un programme qui puisse, pour chaque programme qu'on lui soumettrait, calculer si celui-ci s'arrête ou non au bout d'un temps fini. Le résultat d'indécidabilité concernant la distance informationnelle nous dit que jamais nous ne pourrons concevoir un programme pour calculer, à chaque fois que nécessaire, la distance informationnelle de deux objets. Certains programmes pourront peut-être traiter quelques cas, mais aucun ne pourra les traiter tous, et donc aucun mécanisme général de raisonnement ou de calcul ne pourra servir d'instrument de mesure général pour la distance informationnelle.

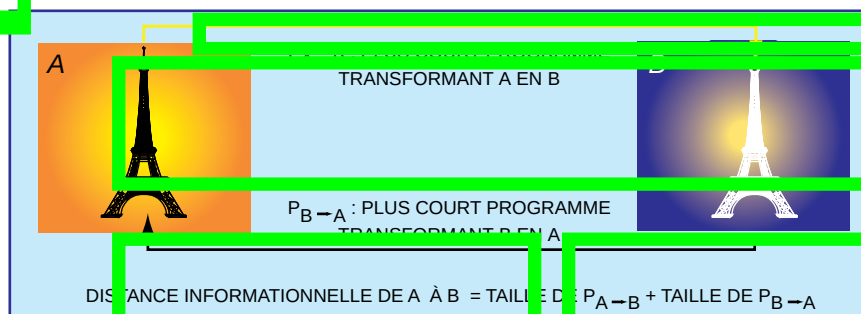
Cette impraticabilité reflète sans doute l'analyse intelligente nécessaire à la formulation des jugements de ressemblance : certains nous sont immédiats, d'autres ne sont perçus qu'après de longues analyses, d'autres encore ne le sont que par certains rares esprits. Est-il alors étonnant que la mesure du degré d'analogie entre des objets quelconques soit difficilement mécanisable et ne puisse pas, en définitive, l'être complètement.

L'intelligence est la cristallisation dans nos gènes, et ensuite dans notre cerveau, des très longs calculs réalisés par l'évolution et par le développement des cultures humaines. L'évolution biologique et le développement culturel sont



5. Pour nous, dans chaque paire les deux dessins se ressemblent clairement. La distance de Hausdorff saisit une partie de ces ressemblances (celles de la partie gauche (a), (b), (c), (d), mais passe à côté de celles de la partie droite (e), (f), (g), (h). La distance de Hausdorff est un moyen efficace mais pas infallible d'appréciation des ressemblances. En revanche, les cas où la distance de Hausdorff était impuissante à voir les ressemblances sont cette fois correctement traités par la distance informationnelle. Le programme pour transformer un dessin en son négatif (e) est très court, les

deux dessins sont donc proches pour la distance informationnelle. Le programme pour ajouter un peu de fumée et celui pour l'effacer (f) sont courts donc les deux dessins sont proches pour la distance informationnelle. Un programme permet de passer d'un dessin à l'autre (g), et ils sont relativement proches (et en tout cas bien plus proches l'un de l'autre que deux dessins quelconques). Quelques indications de remise en forme permettent de passer d'un texte imprimé à l'autre et réciproquement, qui sont donc proches l'un de l'autre pour la distance informationnelle (h).



6. La distance informationnelle entre deux objets A et B s'obtient en additionnant la taille des plus courts programmes permettant de passer de A à B et de B à A. Elle possède des propriétés de minimalité qui lui confère une importance particulière en théorie algorithmique de l'information. De plus les rapports qu'elle a avec la thermodynamique du calcul lui donnent un sens physique que les autres distances ne possèdent pas.

en effet de très longues séquences d'événements assimilables à des opérations élémentaires de calculs dont les produits sont le langage, les sciences et plus généralement nos facultés d'analyse. Ces très longs calculs, sans que nous sachions précisément comment, ont produit dans nos cerveaux une notion d'analogie très fine et très efficace, essentielle à notre survie. Cette cristallisation est incomplète (il n'y a pas de raisons sérieuses de penser que l'algèbre échappe au statut de formalisme partiel), mais elle est bien meilleure que celle que nous réussissons à insérer dans nos programmes : aujourd'hui nous ne savons pas écrire des programmes qui égalent notre capacité à percevoir des analogies.

LA DISTANCE ENTRE SÉQUENCES GÉNÉTIQUES

L'indécidabilité rend-elle la distance informationnelle stérile? Heureusement non, car les manipulations que l'on peut faire la rendent utilisable dans des cas sans doute assez nombreux.

Un exemple d'application de la distance informationnelle est la distance définie dans l'équipe de bio-informatique de Lille, composée de Max Dauchet, Éric Rivals, Jean-Stéphane Varré et moi, pour évaluer la distance entre séquences génétiques. Depuis longtemps les généticiens, et tout particulièrement ceux qui souhaitent faire de la reconstitution d'arbres phylogénétiques (ce sont les arbres qui indiquent les parentés entre espèces animales et végétales), utilisent des mesures de ressemblance entre séquences génétiques. L'idée à la base des distances utilisées jusqu'à présent était le décompte des mutations, délétions ou insertions de nucléotides (les lettres de l'alphabet génétique) : plus le nombre des changements ponctuels nécessaires pour passer d'une séquence à l'autre

est grand, plus les séquences sont considérées comme éloignées. Récemment nous avons proposé une nouvelle distance qui mesure l'éloignement entre séquences en considérant d'autres événements possibles comme les duplications de morceaux de séquences ou leur duplication. Cette distance, que nous avons conçue comme une approximation calculable de la distance informationnelle, est plus précise que les distances utilisées classiquement (qu'on généralise). On peut donc espérer qu'elle fournira des arbres phylogénétiques plus exacts.

Notons encore que les algorithmes modernes de compression de données pour les images de films sont fondés sur l'idée que deux images successives A et B d'une séquence sont proches si pour gagner du temps on peut les recoder en une seule différence. Les qu'on change dans A pour obtenir B. Cette quantité d'informations permettant de passer de A à B est en fait la distance informationnelle entre A et B (ou presque, puisque l'on ne s'occupe pas du passage de B à A).

INTERPRÉTATION THERMODYNAMIQUE

L'interprétation thermodynamique de la distance informationnelle est une autre confirmation de son intérêt. Les cinq chercheurs physiciens, mathématiciens et informaticiens ont en effet démontré un résultat remarquable concernant la distance informationnelle : elle est liée aux coûts thermodynamiques minimaux de la transformation de l'un en B et de B en A.

On sait depuis quelques années, à la suite des travaux de Rolf Landauer et de Charles Bennett, qu'il est possible, en théorie, de réaliser des calculs sans dépense d'énergie et n'entraînant donc aucun accroissement de l'entropie physique. Lors d'un calcul, les seules dépenses d'énergie inévitables proviennent de l'utilisation d'opérations irréver-

ses comme l'effacement d'une mémoire. On peut se passer si l'on accepte de garder des informations inutiles en fin de calcul.

Il est alors intéressant de considérer le flux minimum d'informations (ajout d'informations à A au départ, effacement d'informations à la fin du calcul) que tout système doit pour transformer A en B de manière réversible. Cette distance déduite de considérations thermodynamiques est équivalente à la distance informationnelle : elle en diffère d'un facteur deux au plus. D'autres propriétés de minimalité confèrent, parmi toutes les distances envisageables, un statut privilégié à la distance informationnelle.

La distance informationnelle entre A et B est donc une quantité ayant un sens en thermodynamique, ce qu'aucune autre distance ou notion mathématique de similitude ne possédait jusqu'à présent. L'adéquation entre ce que donne la nouvelle distance et l'intuition, le lien avec le monde physique, ainsi que d'autres résultats sur la distance informationnelle ont convaincu cinq des cinq chercheurs. Charles Bennett montre clairement qu'une notion profonde a été identifiée.

Jean-Paul DELAHAYE est directeur adjoint du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille du CNRS.

e-mail : delahaye@lil.fr

C. BENNETT et al. *Thermodynamics of Computation and Information Distance*. Proc. 25th ACM Symp. Theory of Computation, pp. 21-30, 1993.

C. BERGE, *Espaces topologiques et fonctions multivoques*, Éditions Dunod, Paris, 1966 (voir le chapitre 6).

J.-P. DELAHAYE, *Information, complexité et hasard*, Éditions Hermès, Paris, 1994.

M. LI et P. M. B. VITANYI, *An Introduction to Kolmogorov Complexity and Its Applications*, Springer-Verlag, 1997 (voir le chapitre 3).

J. SERA, *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press, New York, 1982.

J.-S. VARRÉ, *Phylogénie et compression de données*, Publication du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille, Université Lille III, juillet 1996.

J.-S. VARRÉ, E. RIVALS, M. DAUCHET et J.-P. DELAHAYE, *Les distances transformationnelles et applications à la phylogénie*. Journées Analyse des séquences génomiques, École Polytechnique (Palaiseau), 20 et 21 juin 1996.

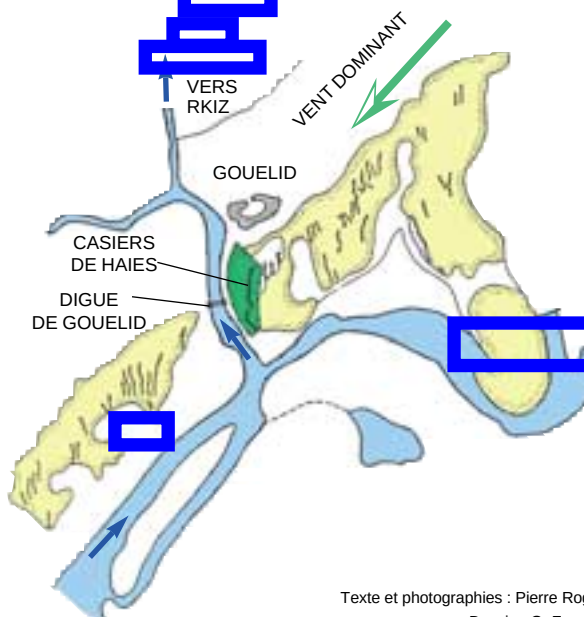
Articles de P. Vitanyi sur Internet : <http://www.cwi.nl/~paulv/publications.html>

L'avancée des dunes

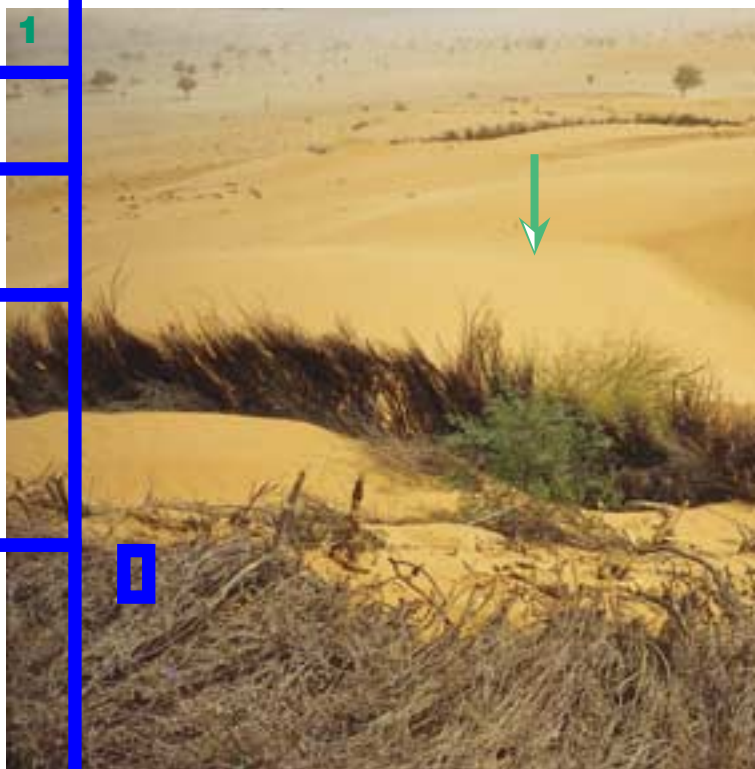
Presque dépourvue de terres irriguées, la Mauritanie fonde de grands espoirs sur l'aménagement des 12 000 hectares de la cuvette de Rkiz, au Sud-Ouest du pays. Cette dépression est actuellement inondée chaque année par un marigot qui y déverse le surplus de la crue du Sénégal en période de hautes eaux. La construction du barrage de Dama, en 1985, permet progressivement de remplacer les cultures de décrue, peu rentables, par des cultures irriguées et permanentes.

Toutefois, le projet ne tenait pas compte de la progression de dunes vives qui, poussées par l'harmattan, vent de Nord-Est, menacent de combler le marigot qui amène l'eau à Rkiz. En effet, la présence de ces dunes dans une région sahélienne couverte d'acacias est inhabituelle. Elle s'explique par l'extrême dégradation de la végétation due au surpâturage et à la surexploitation du bois, dans un milieu fragilisé par les sécheresses persistantes qu'a connues cette région pendant plus de 20 ans.

Pour s'opposer à l'ensablement, des haies de branches finement tissées ont été disposées en casiers, perpendiculairement à la direction de l'harmattan (flèches sur les photographies). Ce dispositif traditionnel n'arrête toutefois que des apports modérés de sable. Aujourd'hui, ces dunes déjà formées s'avancent en vagues successives (voir la photographie 1, face au vent) et submergent rapidement le dispositif de haies pourtant très dense, installé sur la dernière colline avant le marigot (voir la photographie 2). Ayant comblé les casiers (voir la photographie 3), elles redescendent déjà sur le flanc de la colline vers le marigot qu'on aperçoit à l'arrière-plan de la photographie 4 (d'ensemble). Il faudrait mettre en œuvre de nouvelles techniques de lutte contre ces dunes mobiles si on ne veut pas voir disparaître les espoirs d'aménagement de la cuvette de Rkiz.



Texte et photographies : Pierre Rognon
Dessin : G. Forgiarini





Biologie

Non, l'avenir n'est pas héréditaire

Hervé Ponchelet. Éditions Belin, 1997.

Le livre qu'Hervé Ponchelet, journaliste à l'hebdomadaire *Le Point*, consacre à certaines dérives actuelles de la génétique est le cri de protestation, parfois indigné, parfois effaré, d'un observateur extérieur au monde scientifique, mais attentif. Toute la réflexion d'H. Ponchelet se fonde sur les travaux et les commentaires de généticiens et de spécialistes de la procréation eux-mêmes engagés dans le débat ; d'ailleurs, son ouvrage comporte de nombreuses citations. De l'une à l'autre, l'auteur dévide le fil de sa propre analyse et, parfois, manifeste sa révolte. Cette construction très journalistique a l'avantage de fournir un beau reflet des débats actuels sur les dérives de la génétique et de la «procréation». En revanche, elle amène parfois l'auteur à adhérer, successivement, à des analyses dont les principes sont notoirement différents. Peut-être cela rend-il encore plus authentiques les sentiments exposés par un observateur confronté à différentes prises de position, parfois irréductibles les unes aux autres, mais véhiculant toutes au moins des «vérités partielles».

Cette hésitation se ressent particulièrement dans la première partie, qui est consacrée aux liens du sang et à la filiation. L'auteur distingue bien les deux types de filiations caractéristiques du monde de l'homme : la filiation du sang et la filiation de l'esprit. Adversaire évident de la primauté du «droit du sang», opposé aux droits qui reposent sur des liens intellectuels et affectifs, H. Ponchelet n'en n'est pas moins, de manière parfois un peu singulière, très sensible à la revendication virulente du «droit à la connaissance de ses origines biologiques», qu'il s'agisse de la fécondation par sperme de donneur, de l'adoption, voire de l'accouchement sous X.

Cette revendication a de nombreux supporters, notamment parmi les psychanalystes, auxquelles l'auteur donne abondamment la parole. Les arguments présentés sont de trois ordres : droit à la vérité, importance de «l'enracinement» dans le développement harmonieux d'une personnalité et intérêt biologique de l'enfant. Ces trois arguments sont de qualité, mais ignorent habituellement le fait, bien connu de tous les géné-

tiens, qu'environ dix pour cent des enfants nés au monde «naturellement» ne sont pas le couple géniteur théorique... mais sont en fait pas les enfants biologiques de leur père.

Concrètement, le nombre de ces enfants est bien supérieur à celui de ceux issus de l'adoption ou de l'assistance médicale à la procréation. Au nom des principes évoqués précédemment, qui de bonne foi prétendrait qu'il est essentiel de leur indiquer toujours, le moment venu, l'identité du géniteur ? En réalité, l'irrésistibilité et le systématisme de cette revendication d'une connaissance obligatoire de ses origines biologiques procède, qu'on le veuille ou non, de l'analyse que la filiation du sang, la loi des gènes, s'impose de façon incontournable dans l'espèce humaine comme dans le monde animal. Ce sentiment correspond à un fort courant de nos sociétés modernes où la conjonction du rebour à un certain intégrisme religieux et d'un matérialisme de fait amène à considérer que, après tout, les hommes et les femmes n'ont peut-être pas grand-chose d'autre à transmettre à leurs enfants... que leurs gènes.

Dans sa deuxième partie, H. Ponchelet s'inquiète très justement d'une certaine évolution de la génétique des comportements dont les objectifs et les résultats, mal présentés et mal compris, sont «pain béni» pour les vieilles idéologies déterministes et racistes. Le caractère idéologique des assertions plus que «centenaires sur l'inégalité des aptitudes intellectuelles des différentes races est bien souligné, de même que l'absurdité d'un certain réductionnisme rattachant un comportement humain à un déterminisme génétique rigoureux et simple. L'auteur aurait également pu noter l'incroyable erreur de perspective de beaucoup des généticiens du comportement et des neurobiologistes qui franchissent allégrement le pas entre la découverte qu'un gène joue un rôle essentiel dans un comportement adaptatif inné animal, et la conclusion que son influence chez l'homme est similaire. Ce que néglige totalement une telle démarche, c'est le caractère proprement humain de la réappropriation de certains comportements innés. Ainsi, un même trait comporte-

mentiel élaboré par l'évolution depuis des centaines de millions d'années s'exprime-t-il de manière bien différente chez des mammifères humains et non humains : le désir sexuel, par exemple, ne se manifeste chez les chevaux que par la saillie de l'étalon, mais, au-delà de l'acte sexuel lui-même, par près de la moitié de la production poétique et artistique des sociétés humaines !

Là est vraiment le monde de l'homme, et non pas dans le fait évident que de mêmes gènes gouvernent la différenciation mâle ou femelle dans l'espèce humaine et dans les autres espèces !

Dans la troisième partie, l'auteur aborde le grave sujet d'actualité de la «tare génétique». Il illustre la vieille notion de l'atavisme par la saga des Rougon-Macquart de Zola. Il aurait, en fait, pu remonter beaucoup plus loin, par exemple à l'image du destin dans la tragédie grecque. Fardeau génétique, stigmatisation du lignage, certitude d'un destin contraire, la tare génétique est au centre des angoisses et des fantasmes humains. Vouloir y échapper, de toutes ses forces par tous les moyens, fait en effet planer le spectre de la réminiscence des aspirations eugéniques qui, sous une forme ou sous une autre, sont présentes dans les sociétés humaines depuis des millénaires. Avec l'évolution de la génétique moderne, c'est à la fois le «gène prison» et le «gène libérateur» qui s'annoncent, et cela H. Ponchelet le présente avec beaucoup de sensibilité et de lucidité. Le gène impliqué dans la survenue d'une maladie, qu'il aille au statut du coupable principal ou de facteur de prédisposition, c'est en effet à la fois l'espoir d'un traitement de nature à atténuer le fardeau pathologique de l'humanité, mais c'est aussi la menace de transformer les droits de l'homme en droits d'un homme particulier en fonction de ses gènes ! L'ampleur de ces enjeux et l'importance de ces débats sont telles que leur exposition claire par un journaliste attentif et humaniste constitue vraiment la bienvenue.

Axel KAHN

Astronomie

Image du monde

Francesca Bertola (traduit de l'italien par A. Galli et É. Schelstraete). La Renaissance du Livre, 1996.

Ce lumineux ouvrage sur l'imaginaire cosmique nous rappelle que la cosmologie, science de l'univers considéré dans son ensemble, est aussi un projet esthétique. L'étymologie même du mot l'indique : en grec, le *kosmos* désignait d'abord la parure des femmes, les ornements, le bel aspect physique ou moral. La notion de cosmos appliquée à l'organisation de l'univers apparut vers le

vi^e siècle avant notre ère. Attribuée à Pythagore, elle signifie que le «monde» (terrestre et céleste) ou l'«univers» n'est pas décrit par le chaos sur lequel Hésiode avait fondé sa *Théogonie* deux siècles plus tôt ; au contraire, le monde est supposé beau et bien ordonné. Y aurait-il d'ailleurs une physique possible s'il n'y avait des lois réfléchissant un ordre sous-jacent ?

Ces discussions étymologiques sont parfaitement rappelées dès l'introduction de *Imago Mundi* (j'ajoute que le mot latin *mundus* a donné l'adjectif «mondain», qui comporte aussi une connotation esthétique : imagine-t-on un mondain qui serait sale ou débraillé ?). L'auteur, Francesco Bertola, professeur d'astrophysique à l'Université de Padoue, est membre de la fameuse *Academia dei Lincei* qui compta Galilée parmi ses membres et dont la visée humaniste a toujours voulu rassembler les arts et les sciences. Au cœur d'un pays au passé inépuisablement riche, où de somptueuses bibliothèques (Bibliothèque de Babel à Vicence, Bibliothèque vaticane à Rome, Bibliothèque nationale à Naples, Bibliothèque marcienne à Venise, etc.) cachent des trésors peints, gravés, enluminés et où les musées d'histoire des sciences foisonnent (que notre pays en prenne leçon), F. Bertola est idéalement placé pour être le maître d'œuvre de cet ouvrage dont le titre, *Imago Mundi* (Image du Monde) puise à la culture médiévale : il fait référence à ces encyclopédies Honoré d'Autan, xii^e siècle, Gautier de Metz, xiii^e siècle, et Pierre d'Ailly, xv^e, cette dernière ayant été soigneusement consultée par Christophe Colomb avant qu'il n'entreprît ses voyages) et à l'œuvre pour l'œuvre de l'émouvoir le lecteur, par la diversité des phénomènes naturels, et de le faire réfléchir sur l'unité sous-jacente – le «monde, ou univers», étant «l'ensemble des parties qui sont réunies pour former un tout unique». Ainsi s'est mise en place une tradition iconographique dont F. Bertola souligne judicieusement l'extraordinaire continuité.

L'histoire des représentations de l'Univers, depuis les cosmologies de l'Antiquité jusqu'aux théories les plus récentes de l'après Big Bang, montre à l'évidence que le long chemin ayant conduit du cercle, figuration de la perfection divine chez les Grecs, à l'éclatement des débuts univers jaillie de l'inflation chaotique, est pavé de principes de symétrie et d'harmonie. Il n'est pas qu'au-delà de leur importance physique et métaphysique, les représentations de l'Univers ont toujours dégagé une puissante émotion esthétique. La diversité des conceptions et des représentations du cosmos illustre la richesse des civilisa-

tions et des modes de pensée. Cet ouvrage présente une partie du foisonnement de ces conceptions et leur évolution au cours des âges.

Il faut souligner en premier lieu l'extrême qualité du choix de l'iconographie et des commentaires qui accompagnent cette dernière (leur mise en valeur étant plus discutable, comme je le dirai plus loin). Les reproductions vont de manuscrits du xi^e siècle jusqu'aux œuvres d'art contemporain et à l'imagerie scientifique moderne.

En ce qui concerne les représentations anciennes (antérieures au xx^e siècle) le choix iconographique est somptueux : que d'émerveillement pour les lecteurs qui vont pénétrer pour la première fois dans l'univers foisonnant de l'image cosmique, et découvrir les prodiges d'imagination dont ont fait preuve savants et artistes pour mettre en scène les systèmes du monde.

Tous les grands classiques sont au rendez-vous. Parmi les imprimés, on trouve les *Cartes célestes* de Bayer et Dürer, le célèbre livre d'Apianus à figures mobiles, les atlas richement décorés de Césaire et de Doppelmaier, les ouvrages mi-cosmologiques, mi-mystiques de Robert Fludd et Thomas Wright, les étonnants schémas extraits d'œuvres scientifiques aussi capitales que celles de Copernic, de Tycho Brahe, de Kepler ou de Descartes.

On trouve aussi de splendides illustrations de manuscrits célèbres, tels le *Livre des subtilités* d'Hildegarde de Bingen, le *Bévière d'amour* de Maître Ermenaut, le *Liber Floridus* de Saint-Omer, les *Chroniques* d'Arnould de Louvain de Saint-Omer. Là encore ne figurent que quelques grands classiques de l'enluminure médiévale ; pas de surprise ni de découvertes donc pour celui qui connaît déjà le sujet, à l'exception peut-être du manuscrit peint au xv^e siècle par John Teichoff, qui illustre l'astronomie de l'Arabe al-Battani, plus connu sous le nom d'Al-Battani.

En ce qui concerne les illustrations modernes le choix est moins heureux et, surtout, moins riche. C'est l'une des relatives faiblesses de ce livre : l'*Imago Mundi* moderne est sacrifiée. L'auteur a sans doute volontairement restreint son propos à l'image mentale du cosmos, celle qui laisse la part belle à l'imagination et au sens esthétique (le mot image se réfère à la représentation, mais aussi à l'imagination). Cependant, les clichés du fond diffus cosmologique saisis par le satellite COBE, ou encore les cartographies de l'Univers prises dans les domaines spectraux non visibles – radio, infrarouge, rayons X... –, qui constituent l'évolution majeure de

l'observation astronomique de ce siècle, ne dépassaient ni le propos ni l'esthétique de l'ensemble. Or, ils sont totalement absents. Pourtant, ces cartes ne sont pas : «objectives» que cela : le traitement en fausses couleurs arbitraires des clichés astronomiques pris hors du spectre visible relève aussi d'un choix esthétique. Au lieu de cela, nous avons droit à quelques simulations numériques traduites en images de synthèse à résolution pauvre (écran d'ordinateur collige), pour nous montrer la structure à grande échelle de l'Univers ou le modèle d'univers autoreproducteur. Quant aux quelques «vues d'artistes» elles présentent un intérêt iconographique, mais semblent être inférieurs au reste de l'ouvrage.

Imago Mundi n'est pas seulement un livre d'images. Le texte d'accompagnement se divise en une introduction, un développement et des légendes d'illustrations, tous passionnants et faciles à lire pour le lecteur néophyte (notons aussi la présence d'une traduction anglaise en fin d'ouvrage).

L'introduction explicite clairement les intentions de l'auteur. Elle est aussitôt suivie d'un premier cahier iconographique composé de 26 planches imprimées sur du papier calque d'excellente qualité. Le procédé permet de superposer ces visions de l'Univers à travers les siècles et les cultures : grâce à la légère transparence, les représentations se fondent discrètement l'une dans l'autre et, du coup, illustrent parfaitement la continuité de la tradition iconographique.

Le développement intitulé «Brève histoire des conceptions sur l'Univers» est exclusivement chronologique. Il traite successivement des cosmologies grecques, de la vision du monde des Pères de l'Église, de l'univers médiéval, des grands changements que l'astronomie a connus aux xvi^e et xvii^e siècles, des univers-filles supposés, puis découverts par les télescopes des xviii^e-xix^e siècles du devenir de l'univers à travers la révolution relativiste et ses fameux modèles de Big Bang, et d'une réflexion plus philosophique quant au rapport entre l'univers et l'homme. J'ai noté avec plaisir que le texte de F. Bertola contenait de nombreuses citations, toujours judicieuses, émanant non seulement de savants ou de philosophes cosmologues, mais aussi de poètes visionnaires inspirés par la problématique cosmique : Dante (dont l'immortel chef-d'œuvre, *La divine comédie*, est un voyage initiatique à travers les divers cercles du monde et qui rassemble l'ensemble des connaissances cosmologiques de son temps), Edgar Poe (qui,

FRANCE INFO

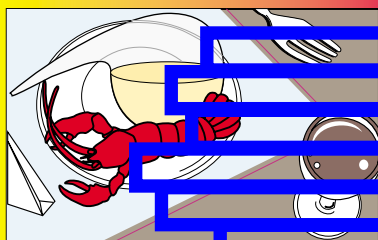
et

POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monchicourt

Info Sciences

Tous les jours
sur **France Info**
à 15 heures 41,
17 heures 10,
20 heures 12,
22 heures 12,
et 23 heures 42



Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 26 mai 1997.

FRANCE

info

dans son poème en prose *Eureka*, entre-
dit notamment la solution cosmologique
de l'énigme du noir de la nuit) ou les Ita-
liens M. Leopardi (auteur d'un célèbre
poème sur l'infini) et Italo Calvino (dont
le recueil de nouvelles *Cosmicomics* est
un régal d'humour et d'intelligence).

Des lecteurs regretteront peut-être
que certains thèmes soient traités super-
ficiellement. Par exemple, la discus-
sion du rapport homme-Univers est
tout juste esquissée. L'interrogation phi-
losophique sur la place de l'homme dans
l'univers, que l'on retrouve si souvent
dans l'imaginaire technique (notamment
chez Fludri), ouvre pourtant à l'épisté-
mologue et au philosophe des sciences
un intéressant champ d'étude : la place
de l'Univers dans l'homme. De même,
le développement historique est peut-
être trop linéaire pour mettre en évidence
toutes les résonances entre les repré-
sentations anciennes et les repré-
sentations modernes.

Puisque *Imago Mundi* doit également
être vu comme un livre d'art, qu'il me soit
permis de donner mon impression per-
sonnelle, qui n'engage que mes goûts
en la matière. Il m'a semblé que la
typographie et la réalisation artistique
de l'ouvrage n'étaient pas tout à fait à
la hauteur du propos. En premier lieu,
la couverture est assez laide, ce qui n'en-
gage guère à découvrir l'intérieur.
Ensuite, les choix de papiers de quali-
tés diverses et de typographies diffé-
rentes ne sont pas toujours heureux.
Cette non-uniformité dans la présentat-
ion matérielle de l'ouvrage, qui devrait
en marquer l'originalité, se révèle mal
maîtrisée. C'était pourtant une bonne
idée. Si le premier cahier iconographique
sur papier calqué est une réussite, les
4 pages d'introduction, si imprimées dans
leur propos, deviennent sur le coup mal-
aisées à déchiffrer parce qu'elles sont
imprimées en caractères majuscules.
Ma principale réserve porte sur le cahier
d'illustrations central, imprimé sur du
papier glacé à fond bleu (pour figurer le
bleu profond du ciel?) qui écrase les
coloriages subtils et les teintes sépias
des gravures anciennes.

En résumé, un très bel ouvrage et
une légère frustration. L'éditeur doit
certainement être remercié pour avoir
accepté d'investir dans un volume coû-
teux, mais les concepteurs n'ont pas
poussé l'audace assez loin pour faire
de *Imago Mundi* l'exact reflet du sujet qu'il
traite : un parfait objet de savoir et d'es-
thétique. La future exposition «Ciel» et
son livre-catalogue, programmés par la
Bibliothèque nationale de France Fran-
çois-Mitterrand, à l'automne 1998, en-
tenteront le pari.

Jean-Pierre LUMINET

Biologie

Les anatomies de la pensée

Alain Prochiantz.

Éditions Odile Jacob, 1997.

À

Qu'est-ce que pensent les calamars? À la
même chose que nous, proba-
blement : à manger, à s'accoupler,
à se défendre. Puisque nous,
humains, sommes assurés de posséder
la faculté de penser, devons-nous admettre
que des bêtes dont le seul destin culturel
est de finir dans une bassine de friture par-
tagent ce privilège? Alain Prochiantz nous
apporte la démonstration éblouissante de
cette unité du vivant qui se définit comme
matière pensante ; la pensée étant conçue
comme le rapport adaptatif que les orga-
nismes entretiennent avec leur milieu,
expression d'un état central fluctuant dans
le temps. L'auteur se situe dans la lignée
des biologistes romantiques : Étienne
Geoffroy Saint-Hilaire, Johann Wolfgang
von Goethe et Claude Bernard contre
Georges Cuvier, Hermann von Helmholtz
et nos modernes mécaniciens du cerveau.

Chaque organisme pense le monde
où il vit (on pourrait dire également qu'il
est pensé par le monde, mais cela sent
trop son philosophe!). Une approche
historique de la vie nous permet d'entre-
voir sa profonde unité et de comprendre
que, dès lors qu'il n'y a pas d'organisme
sans pensée, l'évolution des espèces
conduit inévitablement à une his-
toire naturelle de la pensée. Pour ne consi-
dérer que le monde animal, on verra
comment, à partir d'une pensée initiale-
ment simple, génétique et réflexive, celle
de l'invertébré, la vie a évolué vers une
adaptation fondée sur l'individuation, c'est-
à-dire sur la capacité d'inscrire dans une
structure biologique les leçons de l'his-
toire individuelle et culturelle.

A. Prochiantz est naturaliste comme
d'autres sont poètes ; il est d'ailleurs sou-
vent l'un et l'autre, et c'est en «fanatique
du vivant» qu'il persuade son lecteur de
refuser le concept de machine-organisme
pour ne considérer la vie que dans le rap-
port unissant les organismes à leur milieu ;
celui-ci est tel que le définit Claude Bernard,
«l'ensemble complet avec les milieux des
physiciens. C'est un milieu organisateur
à la fois organique et organogénique qui,
en cela, rejoint le milieu de Charles Dar-
win, support de la sélection naturelle et
grand artisan des organismes. Autre-
ment dit, le propos consiste à réconcilier
l'évolution avec la physiologie, synthèse
demeurée longtemps impossible après
la mort des deux pères fondateurs.

A. Prochiantz est obsédé par la nécessité d'une véritable science du vivant qui soit autre chose qu'une anatomie animée ou une physico-chimie appliquée à la biologie. Son idéologie est si forte qu'un lecteur inattentif ou malveillant pourrait y voir l'esquisse d'une «métabiologie» qui prétendrait remplacer les anciennes métaphysiques. Fondée sur un vivant en devenir, elle tracerait, dans la forêt de l'évolution, les chemins d'une liberté que chaque individu aurait à charge de développer. De tels soupçons feraient injure à notre auteur, qui ne se préoccupe que de science, science du vivant, certes, mais fondée uniquement sur des faits articulés dans des constructions théoriques où la pensée ne s'aventure jamais sans risque.

Dans la théorie que propose A. Prochiantz, la démarche conceptuelle de base lie le temps du développement à celui de l'évolution, rappelant le naturaliste allemand Ernst Haeckel et sa fameuse loi phylogénétique qui stipule que tout organisme récapitule, au cours de son développement embryonnaire, les différentes étapes de l'histoire évolutive de son espèce. Plus proche des faits, le naturaliste russe Karl Ernst von Baer avait déjà observé qu'à un certain stade de leur développement et dans un phylum donné, les vertébrés par exemple, toutes les espèces produisent des embryons morphologiquement assez semblables, alors que de grandes différences séparent les œufs, d'une part, des individus adultes, d'autre part. Ce point privilégié correspondant au stade de ressemblance maximale est nommé point phylotypique : il est représenté comme le goulot d'étranglement d'un sablier. Toutes les formes, aussi diverses soient-elles avant et après, convergent à ce niveau vers une sorte d'archétype du phylum. Il correspond au moment où des gènes dits homéotiques, ou gènes *hox*, imposent à l'animal un schéma général qui est le plan d'organisation du phylum.

Sur les chromosomes, ces gènes sont disposés en complexes ordonnés où ils réalisent une sorte d'homonculus génétique redonnant ainsi une nouvelle jeunesse aux vieilles théories «préformationnistes», qui voulaient que le petit animal soit présent en miniature dans l'œuf ou dans le spermatozoïde, et que le développement ne soit qu'un simple agrandissement de l'animalcule, homonculus dans le cas de l'homme.

Pour revenir au point phylotypique, on comprend à ce niveau de petites variations de la structure des gènes homéotiques ou de la vitesse de lecture des complexes formés par ces gènes puissent conduire à des éclosions de formes le plus souvent monstrueuses, mais parfois, pour reprendre une expression célèbre, porteuses d'espoir évolutif.

Les processus adaptatifs retenus par l'évolution sont partie liée avec les mécanismes développementaux et avec l'existence de plans, ou patrons, héréditaires, qui rendent prédictible la forme animale qui sortira d'un œuf, une fois connue l'origine de ce œuf. La situation est parfaitement résumée par la comptine de Robert Desnos : «Le pélican de Jonathan pondit un jour un petit tourbillon d'œuf, et un pélican, qui s'en tour pondit..., cela peut durer indéfiniment si on ne fait d'omelette avant.» Ces paros sont eux-mêmes contrôlés par les gènes de développement qui définissent la forme des organismes et constituent leur mémoire d'espèce, permettant à chaque génération d'assurer un développement individuel conforme au schéma de cette dernière.

Mais voilà que l'évolution introduit dans la construction des individus une part de «jeu» (comme du jeu dans les rouages) dans la contrainte génétique qui dicte la loi de l'espèce, part réduite à presque rien chez le ver ou chez la mouche, mais qui ne fait qu'augmenter chez les vertébrés, à mesure que les neurones cérébraux multipliant les représentations du milieu rendent la construction du cerveau plus dépendante de l'environnement sensoriel. Alors l'expansion du cerveau prend le relais de l'expansion de la chair, l'enfermée prisonnière des gènes. Enfin l'invention du langage, chez *Homo sapiens*, pousse le processus d'individuation à ses limites actuelles.

Au total, un regard sur l'évolution permet de découvrir les deux grandes stratégies de la vie : clonale ou individuelle. La première, celle des organismes qui vivent au plus près de leur patron génétique, laisse une faible part à l'individuation : qu'une variation importante du milieu survienne telle une baisse mortelle de température, et seuls quelques variants génétiques pourront repeupler le monde. L'autre stratégie, la nôtre, est celle de ceux qui ont suffisamment prolongé le temps du développement pour prendre de la distance avec leur schéma génétique et qui, pour cette raison, se reproduisent plus lentement et en moins grand nombre, rendant impossible l'adaptation clonale. La seule solution adaptative, pour ces espèces, devient l'adaptation individuelle ou accommodation. L'homme est, de toutes les espèces, celle où l'individuation prend le plus de temps à se concrétiser (15 ans pour achever une construction du cerveau, et qui restera toute la vie l'objet de réaménagements permanents). La liberté épigénétique, c'est-à-dire la possibilité pour le milieu de déterminer l'individu, mène le bal à la place d'un génome perdu dans sa solitude clonale.

Ce beau livre, on l'aura peut-être compris, est une magistrale leçon de

ARCHIMEDE

Le magazine scientifique d'ARTE



AU MOIS DE MAI :

Mardi 4 mai à 20 h :

- Le quatrième brevet
- Maquette en soufflerie
- Le soleil brille
- Les rats, des modèles

Mardi 12 mai à 20 h :

- Les vrilles du ponton
- Les tactiques du léopard
- La face cachée de la Lune.
- Le brevet de l'anguille
- Un pont suspendu

Mardi 20 mai à 20 h :

- Chute de pont
- L'analyse des plantes
- Les amateurs en science.
- Le dépôt de brevet.

Mardi 27 mai à 20 h :

- Les traumatismes.
- Les expérimentations animales.
- La thérapie *in utero*.

36 15 ARTE (1,29 F/mn)
<http://www.arte-tv.com>

arte

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 Cinotti (Rédactrice - Secrétaire générale de la rédaction), Bénédicte Leclercq, Luc Alleman, Yann Esnault, Philippe Pajot. Secrétariat de Rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiolliez, Céline Lapert. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Merviel et Christelle Dumas. Direction financière : Pierre Leconte. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Savin. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet. Ont également collaboré à ce numéro : Charles Auffray, Anselme Baird-Smith, Marcel Bournérias, Paloma Cabeza-Orcel, Roland Dachelet, Bettina Debut, Christian Jeanmougin, Nicholas Kurti, Marie-Thérèse Landousy, Bernard Lang, Yannick Maiguen, Claude Olivier, Guy Paulus, Pierre Pfeiffer, Geneviève Piétu, Bernard Rivière.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, John Horgan, Kristin Lewntwyler, Philip Morrison, Madhusree Mukerjee, Sanna Nemecek, Corey Powell, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Paul Wallach, Philip Yip, Glenn Zorpette. Publisher : John Moeling. Chairman and Chief Executive Officer : John Hanley. Corporate Officers : John Moeling, Robert Biewer, Anthony Degutus.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06. Tél. (1) 46 34 21 42.

Télex : 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 : Module - 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 ou 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».

En application de la loi du 2 mars 2007, 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 des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 98A et 98B ainsi qu'un encart jeté publicitaire Uniware.

liberté. Écrit avec insolence et clarté, il nous montre que la science du vivant, loin de réduire l'homme aux dimensions d'une machine pourvu d'esprit, lui propose la seule solution existentielle qui vaille la vie !

Jean-Didier VINCENT

Chimie

Chimie organique avancée

F.A. Carey et R.J. Sundberg.

De Boeck Universités, 1996.

La chimie organique est une discipline plus que centenaire, dont l'enseignement a considérablement évolué : les premiers manuels étaient des inventaires de réactions et de règles empiriques, mais, après les études de mécanismes, qui ont rationalisé la discipline, les manuels ont intégré ces théories, à partir des années 1960.

Cette évolution s'est poursuivie par l'introduction des orbitales moléculaires (on prévoit la réactivité des molécules en étudiant la répartition des électrons dans les molécules), d'une part, et par la conception de réactifs qui permettent de synthétiser des molécules de plus en plus complexes, d'autre part.

Cette publication d'ouvrages prenant en compte l'évolution de la discipline, en vue d'un plus large public que celui des chercheurs, est indispensable : elle permet d'intégrer, dans le savoir de base des étudiants, les notions nouvelles. Le livre *Advanced Organic Chemistry*, que F.A. Carey et R.J. Sundberg ont publié aux États-Unis, avait atteint ce but ; les éditions De Boeck en proposent une traduction pour le public francophone.

L'ouvrage original est divisé en deux parties : *Structure and mechanisms* et *Reaction and synthesis*. Seule la traduction de la première partie est parue sous le titre *Structure moléculaire et mécanisme réactionnels* ; la seconde partie est attendue en français pour avril 1997.

Le volume dont nous disposons est divisé en treize chapitre. Les quatre premiers (Liasons chimiques et structure moléculaire, Principes de stéréochimie,

Principes fondamentaux, Stéréoisomères et Mécanismes réactionnels, Énergie et réaction)

des mécanismes réactionnels en chimie organique) posent les bases indispensables à la compréhension des suivants. Le premier chapitre est une excellente introduction à la théorie des orbitales moléculaires, avec une partie mathématique mini-

male ; les deuxième et troisième chapitres permettent au lecteur d'acquérir des notions approfondies sur la stéréochimie, l'analyse conformationnelle et les effets des substituents. Le quatrième chapitre est principalement axé sur la thermodynamique et la cinétique.

Les neuf chapitres suivants traitent de types de réactions et de réactivité de groupes fonctionnels, entendus de façon très large. Dans chacun d'eux, l'examen des mécanismes inclut la théorie des orbitales moléculaires et l'aspect stéréochimique, avec de nombreux exemples. Les applications à la synthèse organique des réactions étudiées seront présentées dans le second volume.

Dans chaque chapitre, les exemples cités sont récents, une bibliographie soignée, et de nombreux exercices d'application sont tirés des publications de recherche. Les solutions à ces exercices sont données en fin de volume, sous la forme de références dans des journaux courants. L'utilisation conjointe de la table des matières et de l'index, très complet, permet de trouver aisément ce qui se rapporte à un sujet.

Le public auquel s'adresse ce livre me paraît aller de l'étudiant de maîtrise jusqu'au chercheur chevronné, qui pourra y rafraîchir son savoir. Une connaissance élémentaire de la discipline me semble nécessaire pour bien exploiter cet ouvrage. Le titre ne laisse d'ailleurs aucun doute à ce sujet.

Pour les chimistes néophytes en théorie des orbitales moléculaires, le premier chapitre sera un bon début. Les chapitres sur les radicaux et la photochimie seront également bienvenus, car ils abordent des sujets souvent traités de façon limitée dans les manuels. Les exercices corrigés sous la forme de références obligent le lecteur à vérifier ses solutions dans la littérature originale, sans que celle soit prédisposée par l'auteur. Cet effort me semble fructueux.

Sur le fond, j'ai peu de critiques, tant le «Carey et Sundberg» me paraît promis au statut enviable de classique du genre et d'ouvrage de référence. Tout au plus peut-on regretter l'absence de couleurs dans les schémas des réactions électrocycliques, mais c'est un point mineur. La traduction est très agréable, et les Notes qui parsèment l'ouvrage montrent que la traductrice, M. Mollet, a joué un rôle plus actif que celui qui est généralement dévolu à l'éditeur.

Le volume est fort bien imprimé, avec une typographie bien lisible et de nombreux schémas ; la brochure est résistante, ce qui est important pour un livre de 834 pages, et le prix de 325 francs m'incite à recommander vivement cet ouvrage.

C. AMSTERDAMSKY