



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

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

mètres d'altitude dans les Andes tropicales, contiennent 200 fois plus de poussière fine que les échantillons les plus récents : il s'agit probablement de poussière transportée par les vents qui soufflaient sur une Amazonie aride. La glace la plus ancienne contient aussi moins d'oxygène 18 que celle qui s'est formée depuis 10 000 ans ; la température était inférieure d'environ dix degrés à celle d'aujourd'hui. En outre, la limite des glaces éternelles dans les Andes était 1 000 mètres plus bas qu'aujourd'hui : pendant les périodes de refroidissement, les tropiques étaient à la fois plus froides et plus sèches.

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

couches de glace, pendant la dernière glaciation ou juste à la fin : nous sommes loin de cette situation. Toutefois l'ampleur de l'effet de serre provoqué par les activités humaines risque d'être bien plus grande qu'aucun autre événement au cours d'un intervalle interglaciaire, et l'on n'a pas de certitude que le système climatique global reste figé dans son mode actuel de fonctionnement.

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

se produisait, les conséquences seraient catastrophiques. La probabilité d'un tel événement atteindra son maximum dans 50 ou 150 ans, alors que la population mondiale sera trop nombreuse, menacée par la famine et par les maladies et qu'il faudra lutter pour préserver la vie sauvage de la pression toujours croissante sur l'environnement. Nous devons prendre cette éventualité au sérieux et faire tous les efforts possibles pour mieux comprendre le système climatique de notre planète.

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

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

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

D.R. MACAYEAL, *A Low-Order Model*

of the Heinrich Event Cycle, in *Paleoceanography*, vol. 8, n° 6, pp. 767-773, décembre 1993.

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

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

Les mémoires holographiques

DEMETRI PSALTIS • FAI MOK

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

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

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

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

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

Toutefois, pour enregistrer beaucoup plus de données – quelques centaines de milliards d'octets, par exemple, dans un disque –, on devra changer complètement de technique. Quelques équipes étudient une méthode prometteuse : l'holographie. L'idée remonte à 1964, lorsque Pieter van Heerden, de la Société *Polaroid*, proposa pour la première fois l'utilisation de cette méthode pour le stockage tridimensionnel des données. On pense aujourd'hui qu'une mémoire holographique pourrait stocker des centaines de milliards d'octets ; elle les transférerait à une vitesse supérieure à un milliard de bits par seconde et sélectionnerait une donnée élémentaire, choisie au hasard, en moins de 100 microsecondes. Ces atouts ont incité de grandes compagnies comme *Rockwell*, *IBM*, *Thomson*, *Sony* ou *GTE* à s'intéresser de près à la mise au point des mémoires holographiques.

Quand les premières de ces mémoires seront commercialisées, leur



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

coût et leur nouveauté les confineront probablement à une poignée d'applications spécialisées exigeant une capacité et une vitesse extraordinaires. De telles utilisations apparaissent déjà : un système holographique mémorise les empreintes digitales de personnes autorisées à pénétrer dans des lieux d'accès restreint et ouvre un accès lorsque le doigt placé sur une plaque de verre est reconnu. Si les mémoires holographiques deviennent moins coûteuses, en satisfaisant un nombre croissant de tels besoins, elle pourront ensuite remplacer les disques optiques

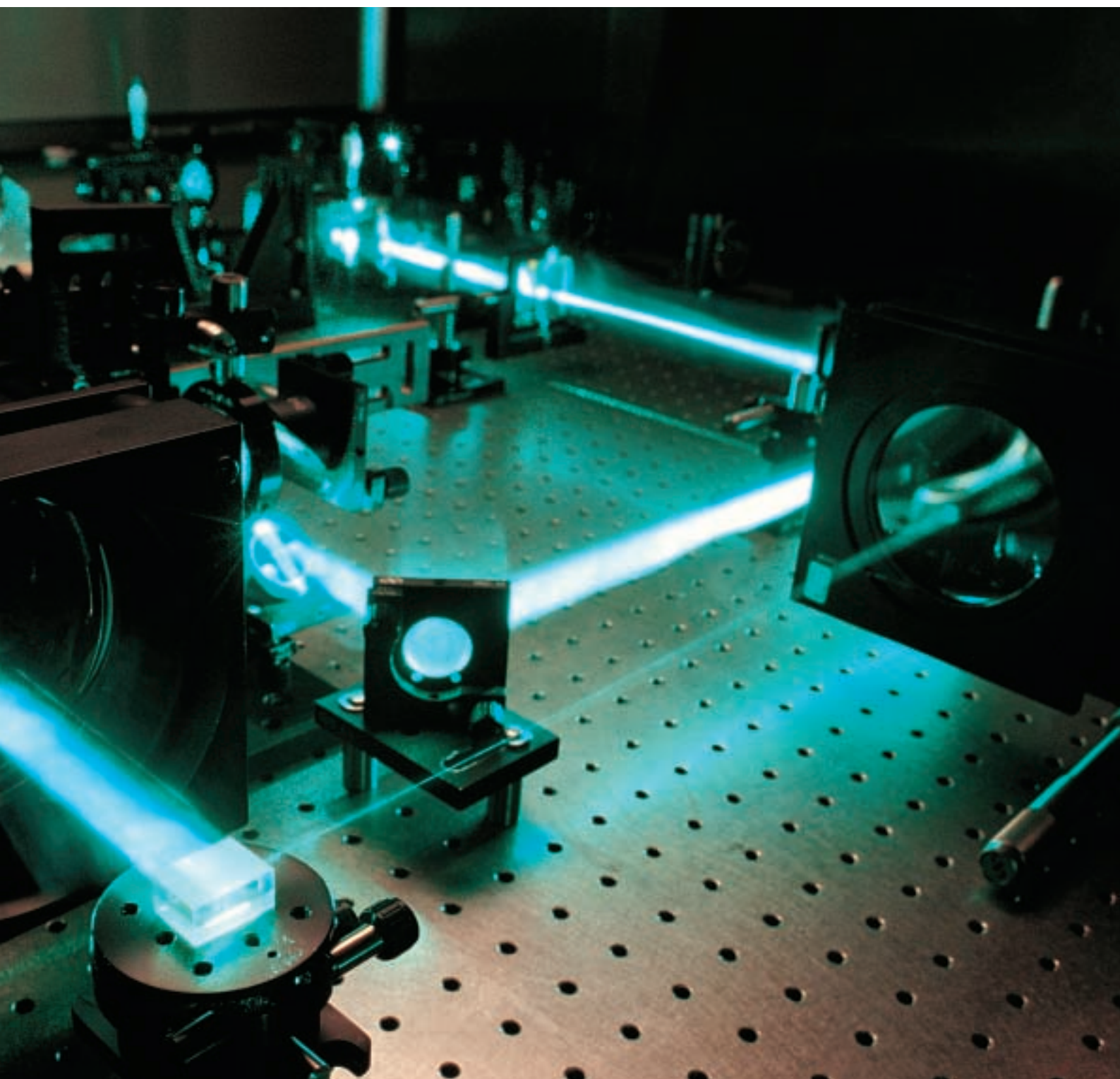
comme supports de stockage de données pour les ordinateurs personnels.

Cristal qui se souvient

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

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

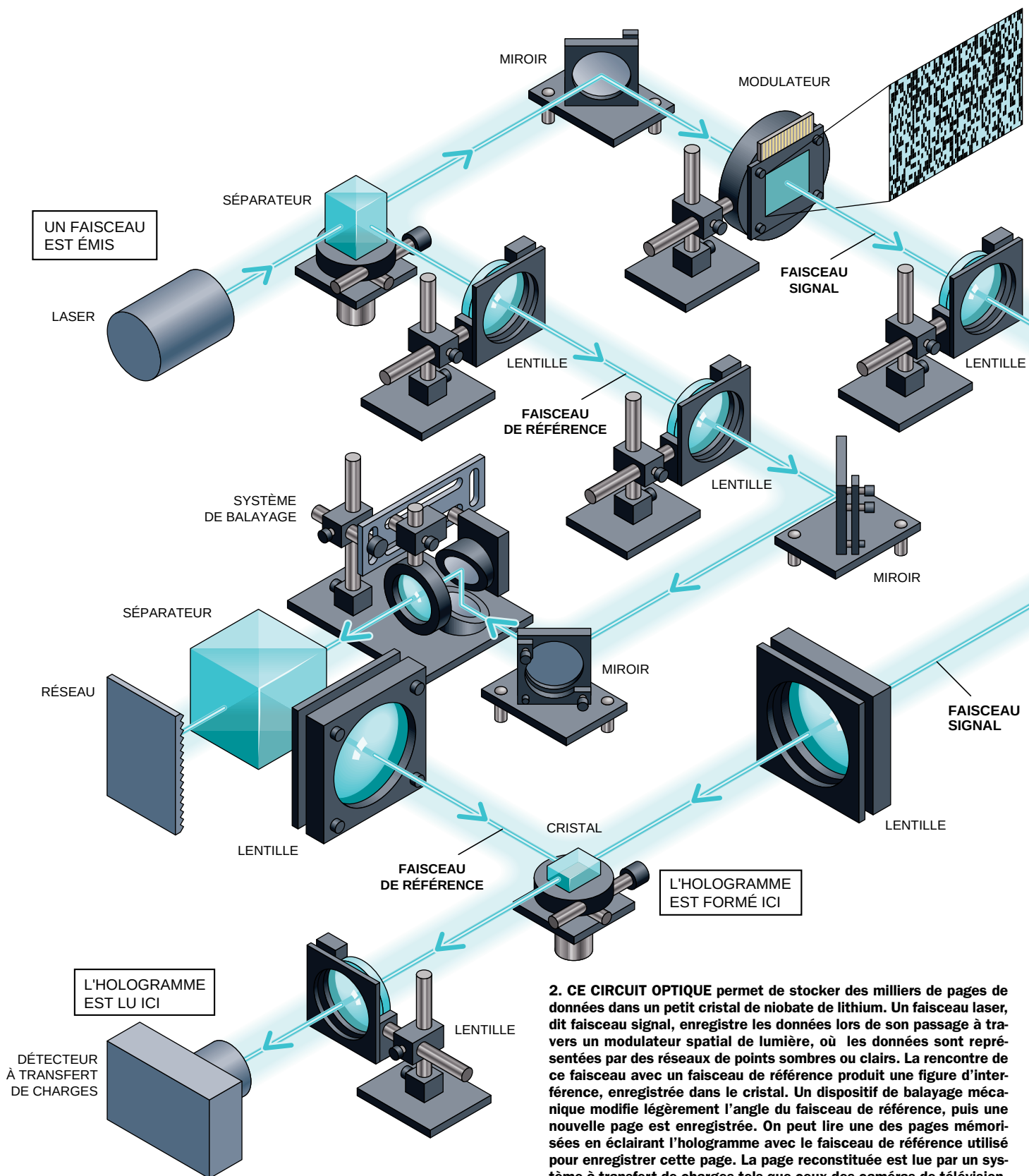
Avant d'être écrits dans le matériau photosensible, les bits doivent être affichés sur un petit écran à cristaux liquides sous la forme d'un réseau de carrés transparents ou opaques. Après la focalisation par des lentilles, un faisceau laser bleu-vert qui a traversé ce réseau, ou «page», forme un «faisceau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



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

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

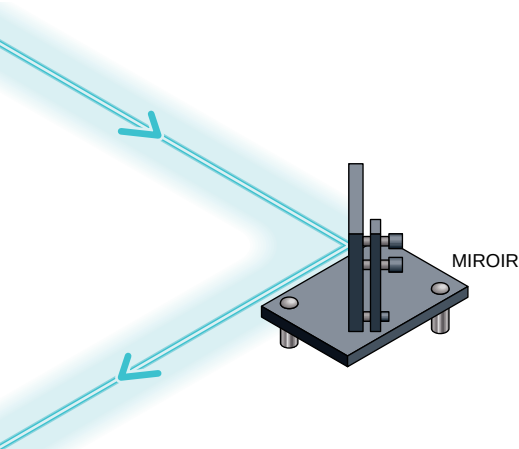
lumineuse est dite plane). La figure d'interférence produite par la rencontre du faisceau signal avec le faisceau de référence crée des zones de divers indices de réfraction au sein du cristal.



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

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

Pour fonctionner correctement, les systèmes holographiques doivent uti-



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

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

cipalement limité par les propriétés dynamiques du matériau : à mesure que le nombre d'hologrammes occupant un même volume cristallin augmente, l'intensité de chacun diminue. Plus précisément, la fraction de lumière diffractée par chaque hologramme (et captée par les détecteurs électro-optiques) est inversement proportionnelle au carré du nombre d'hologrammes superposés : le rendement de diffraction, qui serait de un pour cent dans un cristal où l'on écrirait dix hologrammes, chuterait à 0,0001 pour cent pour 1 000 hologrammes. Cet effet détermine le nombre maximal d'hologrammes qui peuvent être enregistrés, les reconstitutions devenant finalement trop faibles pour être isolées du bruit de fond dû aux fluctuations de l'intensité des lasers, à la diffusion par le cristal, aux électrons d'origine thermique dans le détecteur, etc. En pratique, quand l'efficacité de diffraction est trop faible pour reconstituer les pages de manière fiable, le taux d'erreurs devient inacceptable.

Des signaux plus puissants

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

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

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

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

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

Avec un dispositif analogue, on a ensuite stocké 10 000 pages de 320×220 bits chacune : au total, on mémorisait ainsi un peu moins de 100 millions de « mots » (100 méga-mots). La plupart des 10 000 hologrammes enregistrés étaient des réseaux binaires aléatoires, analogues aux données qui seraient emmagasinées dans un ordinateur classique. La proportion d'erreur, avant correction, était d'un bit sur 100 000, ce qui est suffisant pour le stockage d'images, notamment si les données n'ont pas été comprimées. Dans les pages enregistrées, nous avons placé quelques photographies de visages et d'objets, afin de démontrer qu'une mémoire holographique peut facilement contenir à la fois des images et des données binaires. L'information contenue dans les 10 000 hologrammes n'aurait rempli qu'un huitième d'un disque compact classique, mais on peut réaliser des mémoires holographiques de capacité supérieure en enregistrant les hologrammes en plusieurs endroits différents d'un même cristal : nous avons notamment fait fonctionner un dispositif à 16 sites, où 10 000 pages de données étaient enregistrées sur chaque site.

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

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

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

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

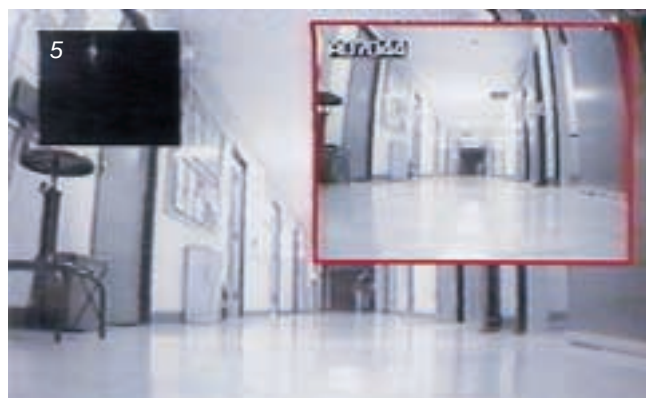
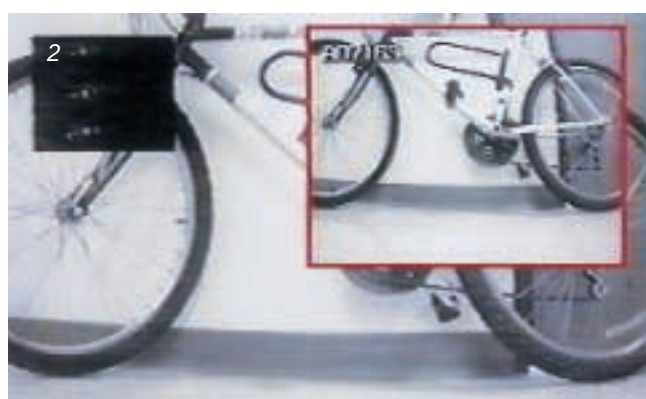
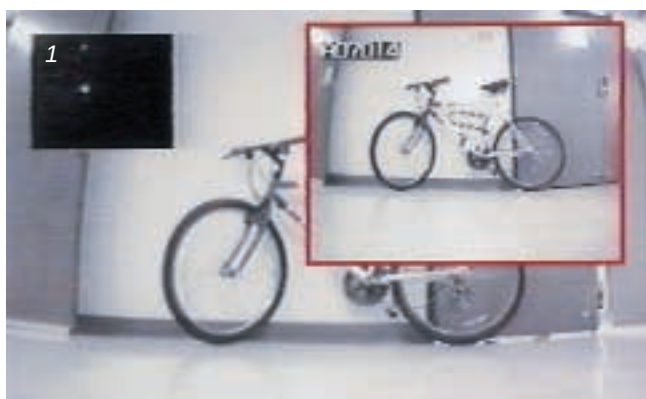
Les polymères de demain

Ces tests récents utilisaient, comme les premières expériences des années 1970, un cristal de niobate de lithium contenant des traces de fer. Lorsqu'un tel cristal est éclairé par un réseau optique – tel l'hologramme produit par l'intersection de deux faisceaux laser –, les particules électriquement chargées migrent dans le cristal, engendrant ainsi un champ électrique interne qui correspond au réseau optique. Ce champ électrique module la diffraction de la lumière par le cristal : quand celui-ci est éclairé à nouveau, avec un angle d'incidence approprié, la lumière diffractée reconstitue l'hologramme initial par effet photoréfractif.

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

sous l'action de la lumière. Des charges électriques ne sont pas déplacées, et la transformation photochimique est permanente : l'information ne pouvant être effacée et réécrite, ce matériau ne convient que pour des mémoires «mortes», qu'on lit seulement, mais il a un rendement de diffraction 2 500 fois supérieur à celui d'un cristal de niobate de lithium de la même épaisseur. Avec Allen Pu et Kevin Curtis, l'un d'entre nous (D. Psaltis) a effectué une expérience où 1 000 pages de bits étaient enregistrées dans un film de polymère de 0,1 millimètre d'épaisseur, puis restituées sans aucune erreur.

Ces dernières années, des ingénieurs de recherche de la Société *IBM* et de l'Université d'Arizona ont commencé à tester des films de polymères photoréfractifs. Les résultats sont prometteurs, mais il est trop tôt pour abandonner le niobate de lithium, qui s'est récemment révélé d'une grande souplesse d'emploi. Par exemple, des cristaux de niobate de lithium dopé avec des traces de cérium et de fer – deux éléments sensibles à la lumière rouge plutôt qu'à la lumière verte – sont disponibles depuis peu. Ils préfigurent des cristaux qui pourraient être gravés à l'aide de lasers à semi-conducteurs,



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

Un emprunt et une nouveauté

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

Tout d'abord, l'industrie opto-électronique a appris à produire des appareils compacts, efficaces et bon marché pour fabriquer en série des mémoires holographiques et pour les relier aux ordinateurs. Par exemple, les petits lasers à semi-conducteurs qui ont été initialement mis au point pour les transmissions par fibres optiques peuvent être utilisés comme sources de lumière rouge, activant soit les cristaux de niobate de lithium dopés au cérium et au fer, soit les photopolymères. Les détecteurs des caméras de télévision, conçus à l'origine pour les projecteurs vidéo,

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

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

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

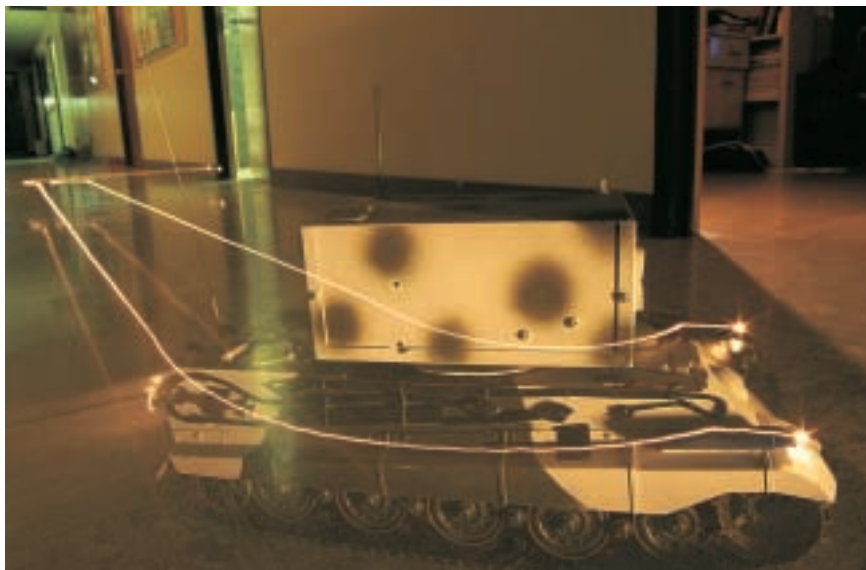
ment on peut enregistrer les pages successives à l'aide de faisceaux de référence de longueurs d'onde différentes. On utilise des faisceaux de référence codés avec des grilles différentes pour chaque page, comme l'étudiant Gérald Roosen et ses collègues de l'Institut d'optique à Orsay.

Avec de gros cristaux

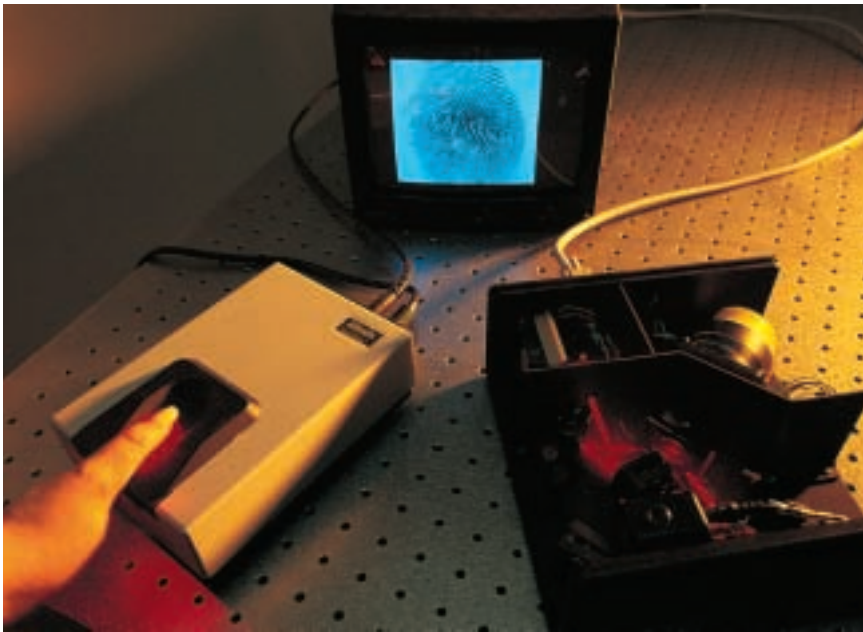
Malgré l'intérêt de ces perfectionnements, les mémoires holographiques ne s'imposeront que si l'on trouve des principes nouveaux pour accroître leur capacité. On a montré que les mémoires holographiques actuelles sont beaucoup plus rapides que les systèmes à disques compacts, mais la vitesse à elle seule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

Pour augmenter le volume de stockage d'une mémoire holographique, une possibilité, nommée multiplexage spatial, consiste à paver une surface à deux dimensions avec de petits cristaux cubiques : les données sont enregistrées dans ces cubes par multiplexage angulaire, et la capacité totale du système est proportionnelle au nombre de cubes.

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



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



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

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

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

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

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

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

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

Mémoires associatives

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

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

Au début de 1995, A. Pu, Robert Denkewalter et D. Psaltis ont utilisé une mémoire holographique de ce genre pour piloter un petit véhicule dans le bâtiment d'électrotechnique de l'Institut de technologie de Californie. Des images des couloirs et des salles, préalablement enregistrées dans une mémoire holographique reliée à un ordinateur numérique, sur un banc de laboratoire, étaient transmises au véhicule par liaison radio. Le véhicule, inversement, transmettait l'image de son environnement par une caméra de télévision émettant par radio. L'ordinateur comparait les images transmises par la caméra à celles qui étaient contenues dans la

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

Nous construisons aujourd'hui un autre véhicule, que nous espérons équiper d'une mémoire suffisamment grande pour lui permettre de se déplacer de façon autonome n'importe où sur le campus. Même avec une mémoire de cette taille, le fonctionnement en parallèle de la mémoire holographique devrait permettre de rappeler les informations enregistrées assez vite pour que le véhicule suive les rues et évite les obstacles. Un tel système de pilotage est probablement l'une des applications spécialisées dont le succès permettra de généraliser l'utilisation de cette technique. À mesure que le besoin d'enregistrer de grandes quantités d'informations augmentera, l'intérêt de les emmagasiner dans trois dimensions plutôt que dans deux ne pourra que croître.

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

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

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

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

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

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

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

La loi des gènes

RICHARD DAWKINS

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

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

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

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

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