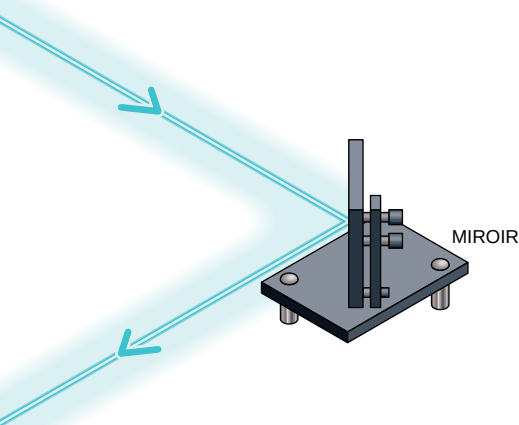


On lit une page qui a été enregistrée de cette façon en envoyant à nouveau le faisceau de référence sur le cristal, suivant un angle d'incidence égal à celui de l'écriture des données : en traversant le cristal, le faisceau de référence est diffracté de telle façon qu'il reproduit l'image de la page 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.

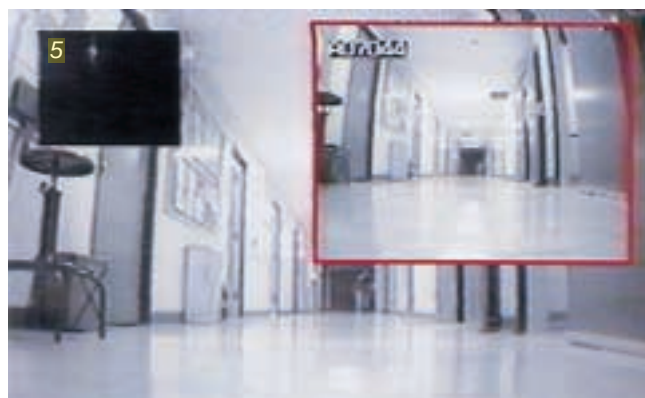
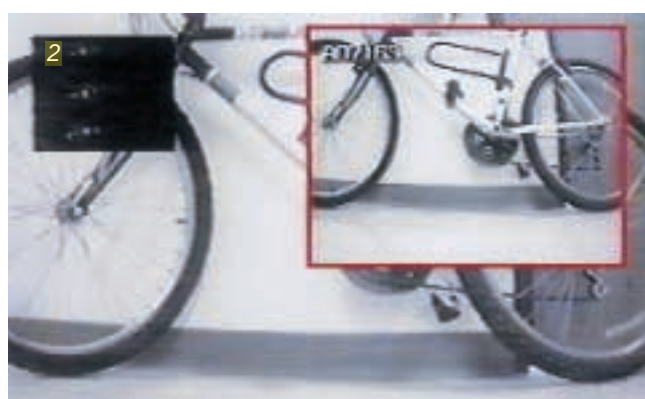
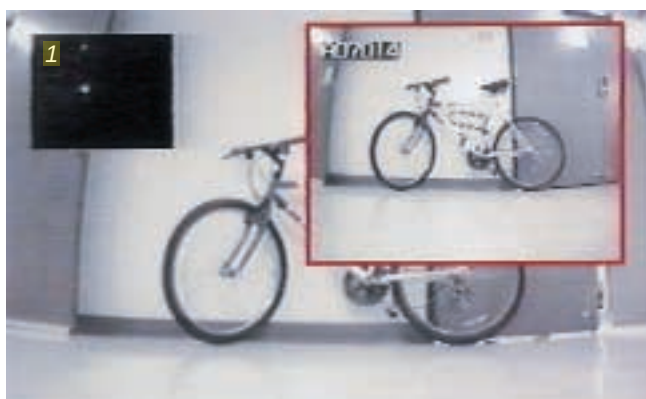
Les polymères de demain

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-

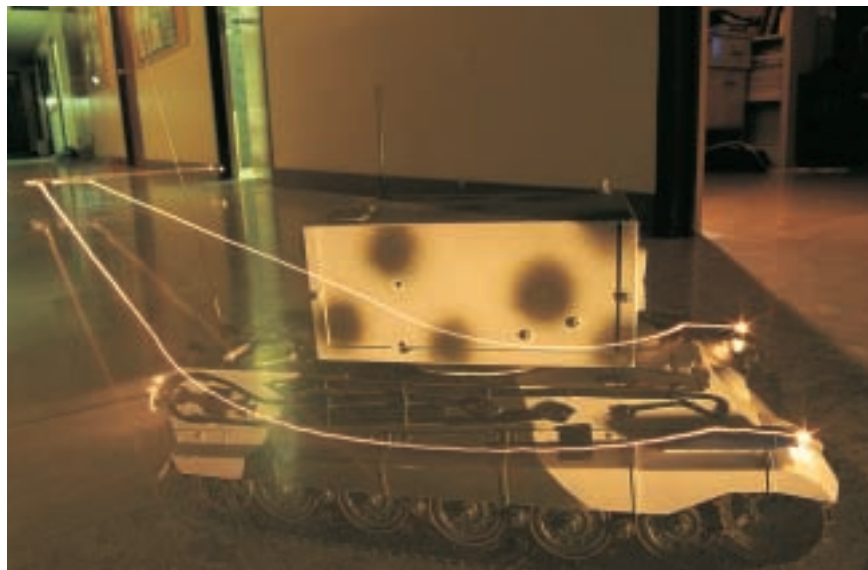
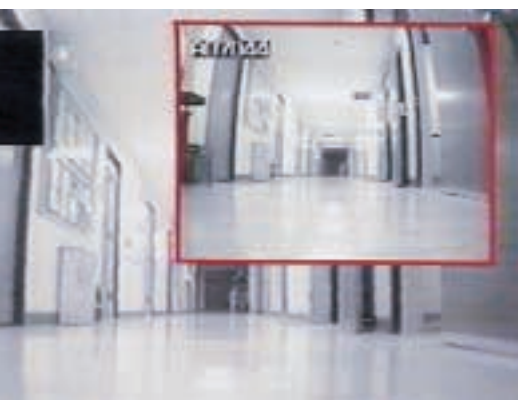
ment on peut enregistrer les pages successives à l'aide de faisceaux de référence de longueurs d'onde différentes. On utilise des faisceaux de référence codés avec des grilles différentes pour chaque page, comme l'étudiant Gérald Roosen et ses collègues de l'Institut d'optique à Orsay.

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. Chaque 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.