

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-

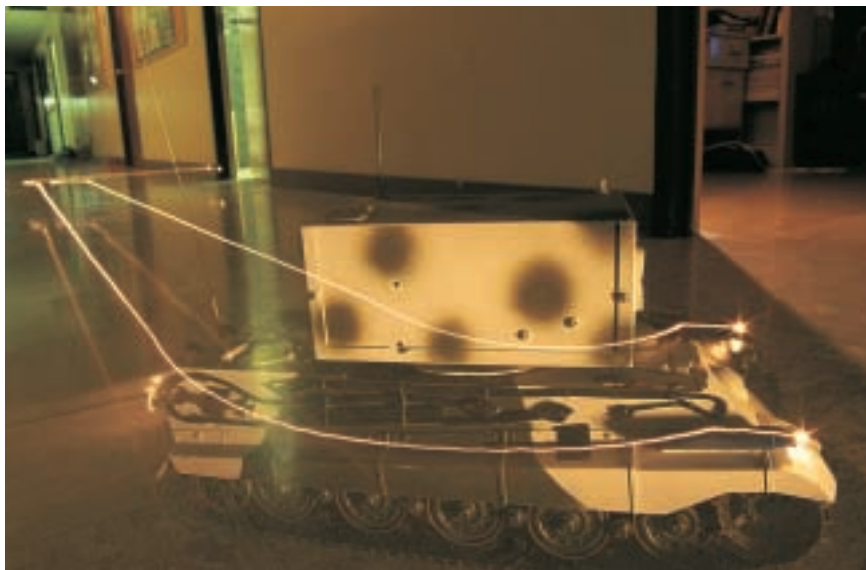
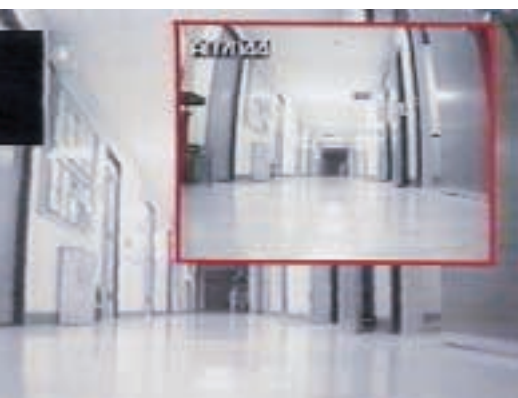
ment on peut enregistrer les pages successives à l'aide de faisceaux de référence de longueurs d'onde différentes. On utilise des faisceaux de référence codés avec des grilles différentes pour chaque page, comme l'étudiant Gérald Roosen et ses collègues de l'Institut d'optique à Orsay.

## Avec de gros cristaux

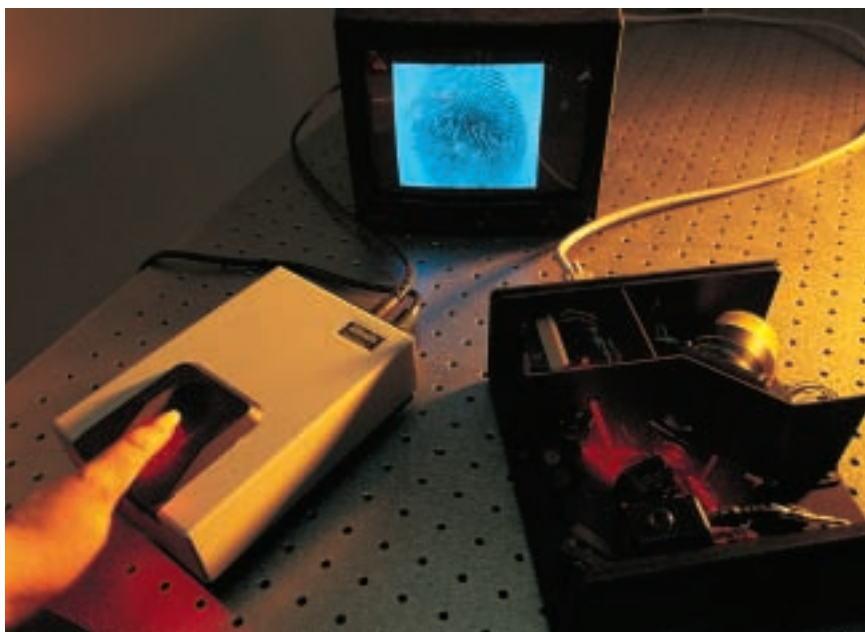
Malgré l'intérêt de ces perfectionnements, les mémoires holographiques ne s'imposeront que si l'on trouve des principes nouveaux pour accroître leur capacité. On a montré que les mémoires holographiques actuelles sont beaucoup plus rapides que les systèmes à disques compacts, mais la vitesse à elle seule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



**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