

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

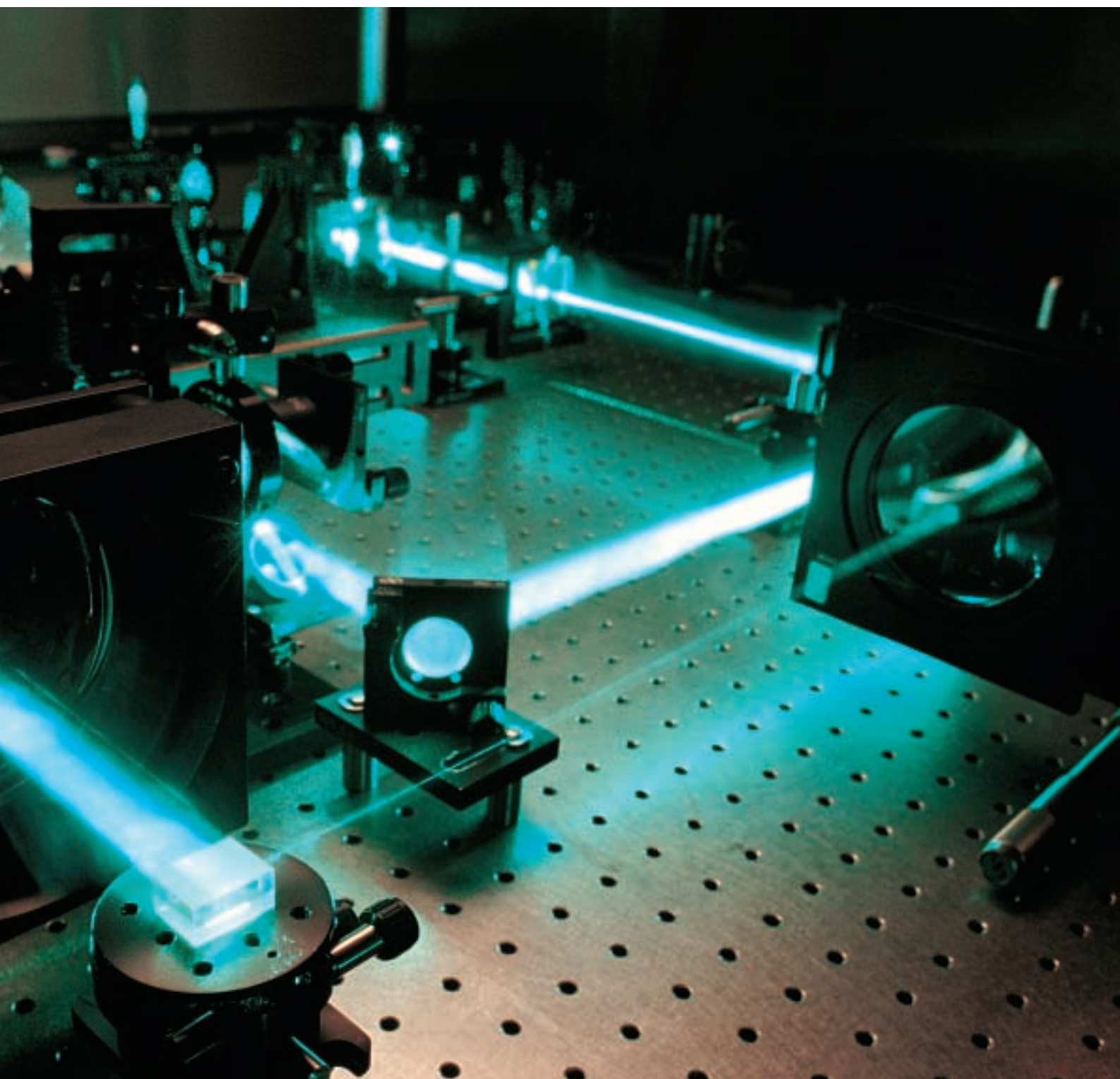
comme supports de stockage de données pour les ordinateurs personnels.

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 par 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.

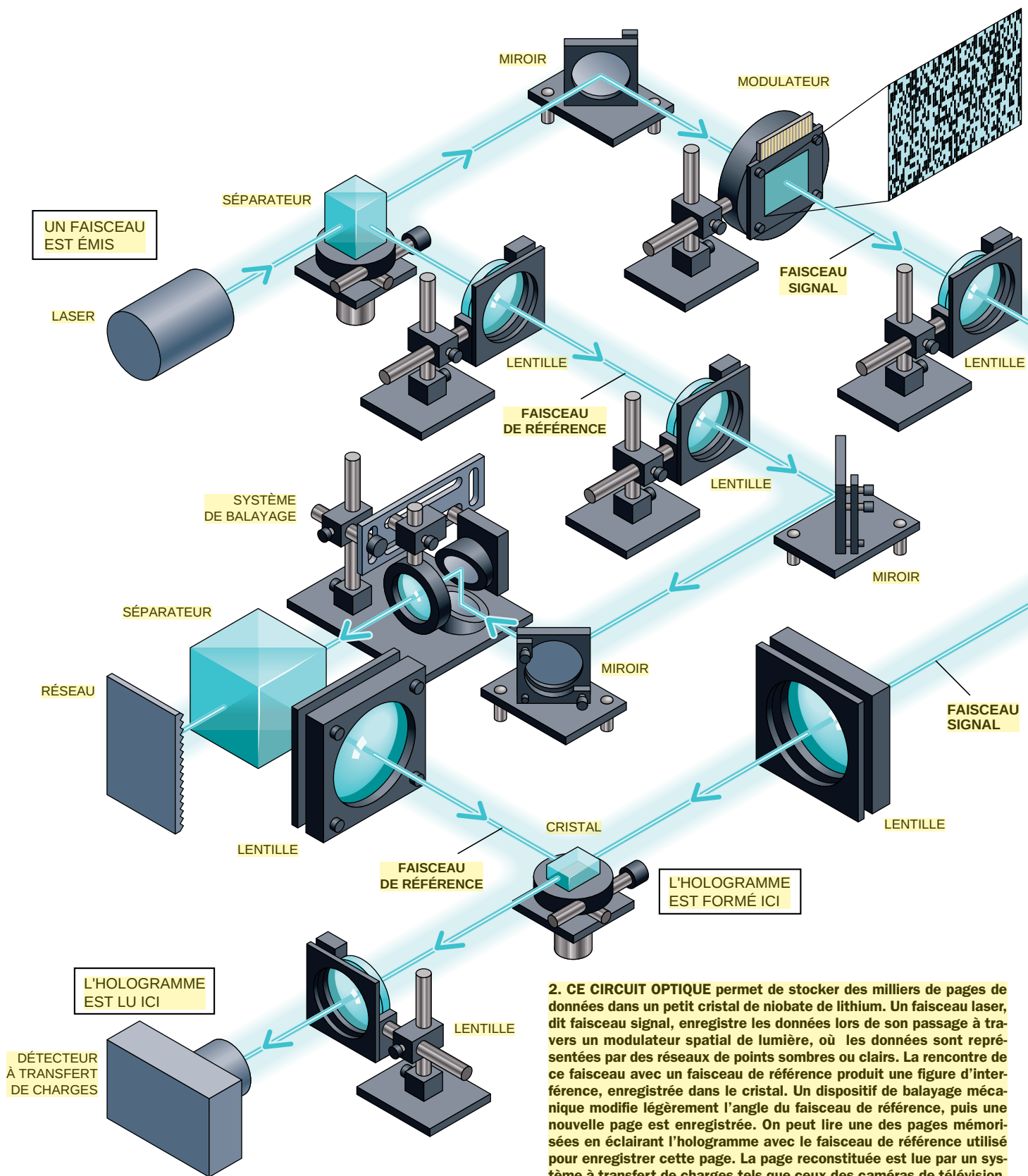
Avant d'être écrits dans le matériau photosensible, les bits doivent être affichés sur un petit écran à cristaux liquides sous la forme d'un réseau de carrés transparents ou opaques. Après la focalisation par des lentilles, un faisceau laser bleu-vert qui a traversé ce réseau, ou «page», forme un «faisceau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

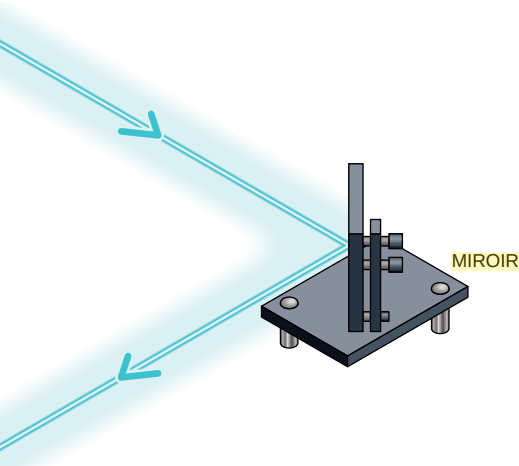
lumineuse est dite plane). La figure d'interférence produite par la rencontre du faisceau signal avec le faisceau de référence crée des zones de divers indices de réfraction au sein du cristal.



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 reconstitution 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 semiconducteurs 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