

Mémoires holographiques de volume par codage en phase

Les techniques informatiques nécessitent des moyens de stockage de capacité toujours accrue. Bien que les systèmes actuels, disques optiques et mémoires magnétiques, progressent toujours, d'autres types de mémoires essaient de s'imposer. C'est le cas des mémoires holographiques de volume. Leurs capacités, temps d'accès et débits potentiels pourraient les rendre compétitives dans un avenir proche.

Des recherches très actives sont actuellement poursuivies de par le monde pour accroître les capacités des mémoires informatiques. Pour y parvenir, une voie consiste à développer des mémoires optiques où les informations sont enregistrées dans tout le volume du matériau et non plus seulement en surface comme elles le sont dans le cas des disques optiques. Pour des données binaires, la capacité théorique d'une mémoire optique de volume est égale au volume du matériau divisé par le volume du plus petit détail accessible optiquement, soit environ le cube de la longueur d'onde. Ceci conduit à des capacités théoriques gigantesques de l'ordre de 10^{14} bits/cm³. Ces valeurs ont motivé les premiers travaux sur l'enregistrement holographique dans les années 70. L'émergence de nouvelles technologies concurrentes, telles que le stockage magnétique et les disques optiques, ainsi que l'absence des composants optoélectroniques performants pour entrer et sortir les informations des mémoires holographiques, expliquent l'abandon partiel de ces activités à la fin des années 70. Les composants nécessaires sont aujourd'hui disponibles, qu'il s'agisse de matrices à cristaux liquides adaptées à la com-

position des pages à enregistrer ou de caméras à transfert de charge pour la lecture des informations mises en mémoire, ce qui explique le regain d'intérêt actuel pour ces recherches.

Si les mémoires optiques de volume séduisent toujours par les capacités élevées (10^{12} bits) qu'elles promettent, on espère aussi qu'elles permettront d'atteindre des temps d'accès sub-milliseconde. Ces temps d'accès très courts, ainsi que le mode d'enregistrement et de lecture sous la forme d'images représentant chacune une page de données, autorisent de grands débits d'information (1 Gbit/s). Les applications potentielles souvent citées sont les mémoires de masse pour la micro-informatique, les mémoires d'archives ou les mémoires de hauts débits pour distribuer des informations à la demande (document vidéo ou autres) sur des réseaux.

LES TECHNIQUES DE CODAGE

L'enregistrement holographique, la plus utilisée des techniques de stockage en volume, consiste à exposer le matériau photosensible à la figure d'interférence produite par un faisceau de référence et un faisceau image, tous deux issus de la même source laser (encadré 1). Les informations à enregistrer sont généralement imprimées sur le faisceau image sous la forme d'une page de données, à l'aide d'une matrice de

modulateurs à cristal liquide. La transparence de chaque modulateur élémentaire, qui définit un pixel de l'image, est contrôlée électriquement. Lorsqu'ils ne possèdent que deux niveaux de transmission, les pixels codent chacun 1 bit d'information. L'hologramme enregistré contient toutes les informations du faisceau image sous la forme d'une distribution spatiale de transmission ou d'indice de réfraction. Elle est proportionnelle au produit $E_I E_R^*$ des amplitudes complexes du champ électrique de l'onde image par celui de l'onde de référence. La relecture par une onde d'amplitude E_L créée par diffraction une onde d'amplitude proportionnelle à $E_I E_R^* E_L$. Si l'onde de lecture est identique à celle de référence alors l'onde diffractée est identique au faisceau image. Un détecteur matriciel, tel qu'une caméra à transfert de charge, retranscrit les données sous forme électrique.

La capacité d'une mémoire ainsi construite est égale au nombre de pixels du modulateur, soit au maximum environ 1 Mbit. Pour augmenter la capacité, on peut enregistrer plusieurs de ces hologrammes côte à côte à la surface du matériau photosensible. Cependant, le stockage d'un grand nombre d'hologrammes par cette méthode fait appel à des dispositifs mécaniques qui effectuent le déplacement des faisceaux lumineux par rapport au support d'enregistrement. Ainsi, dans le cas des disques holographiques, le

HOLOGRAMMES MINCES, HOLOGRAMMES ÉPAIS

Une onde image est enregistrée dans un matériau photosensible par interférence avec une onde référence (figure 1a). Ces deux ondes, supposées quasiplanes, sont représentées respectivement par les champs électriques d'amplitudes complexes E_I et E_R , de pulsation ω et de vecteurs d'onde $\vec{k}_{I,R}$. Le matériau est donc impressionné par la figure d'éclairement quasi périodique I :

$$I \propto \left(I + \frac{E_I E_R^*}{\|E_I\|^2 + \|E_R\|^2} e^{i(\vec{k}_R - \vec{k}_I) \cdot \vec{r}} + \frac{E_I^* E_R}{\|E_I\|^2 + \|E_R\|^2} e^{-i(\vec{k}_R - \vec{k}_I) \cdot \vec{r}} \right) \quad (1)$$

Le premier terme d'interférence contient toutes les informations de l'onde image. Pour avoir une reproduction fidèle, nous imposons à $\|E_R\|$ d'être indépendant du vecteur position \vec{r} et, d'être beaucoup plus grand que $\|E_I\|$ pour tout \vec{r} . L'hologramme est ensuite développé, soit par un procédé chimique s'il s'agit de plaques photographiques, soit automatiquement et pendant l'illumination pour les matériaux photoréfractifs. Sa fonction de transmission reproduit la figure d'éclairement qui l'a construit.

Considérons un hologramme mince, par exemple d'épaisseur inférieure à la longueur d'onde. Lorsque l'onde de lecture

$E_L e^{i(\omega t - \vec{k}_L \cdot \vec{r})}$ traverse un tel hologramme (figure 1b), elle se divise en trois composantes respectivement associées aux trois

termes de l'équation 1. La composante produite par le premier terme d'interférence est proportionnelle à

$E_I E_R^* E_L e^{i(\omega t - (\vec{k}_I - \vec{k}_R + \vec{k}_L) \cdot \vec{r})} + c.c..$ Emise dans la direction $\vec{k}_I - \vec{k}_R + \vec{k}_L$, elle correspond à une diffraction dans l'ordre $+1$ sur le réseau que constitue l'hologramme. Si l'onde de lecture est identique à la référence utilisée pour l'enregistrement le signal diffracté dans l'ordre $+1$ reproduit exactement l'onde image. Cependant, même si cette condition n'est pas satisfaite, l'onde diffractée existe, quelle que soit la direction ou la longueur d'onde de l'onde de lecture. Il n'en est pas de même dans un hologramme épais.

Un hologramme épais est équivalent à la juxtaposition d'une série d'hologrammes minces. Si l'onde de lecture diffère de l'onde de référence d'écriture (par exemple par son vecteur d'onde), les ondes d'ordre 1 diffractées par les différentes couches ne sont pas en phase (figure 2a). Si les différences sont importantes, les interférences sont totalement destructives et l'efficacité de diffraction est nulle. Les ondes diffractées interfèrent de façon constructive à condition que les ondes de référence de lecture et d'écriture soient identiques (figure 2b). Cette condition d'accord de phase, ou condition de Bragg, permet de distinguer des hologrammes qui occupent le même espace physique. Typiquement, pour les échantillons photoréfractifs utilisés comme mémoires, la sélectivité angulaire de Bragg est meilleure que 0.1 mrad.

support se déplace sous une tête d'écriture/lecture fixe. Le temps d'accès aux informations se trouve alors accru.

Une solution pour éviter tout déplacement mécanique consiste à utiliser la sélectivité par accord de phase dans les hologrammes épais (encadré 1). Suivant cette propriété, l'efficacité de reconstruction de l'image enregistrée dans un matériau épais se dégrade fortement dès que le faisceau de lecture diffère du faisceau de référence utilisé à l'enregistrement. La restitution est optimale à condition que les deux ondes coïncident à la fois en longueur d'onde, angle d'incidence et struc-

ture spatiale de phase. Cette propriété, encore appelée sélectivité de Bragg, permet de superposer différents hologrammes dans le même volume du matériau. Chacun est enregistré entre un faisceau image contenant des informations et un faisceau de référence dont une caractéristique est modifiée à chaque nouvel enregistrement. Qu'il s'agisse de la longueur d'onde, de l'angle d'incidence ou de la structure spatiale de phase, cette caractéristique sert d'adresse pour les images et on parle alors de multiplexage par longueur d'onde, de multiplexage angulaire ou de codage en phase. Pour restituer une image, on relit les hologrammes

avec le faisceau de référence portant l'adresse de cette image. Si les adresses sont correctement choisies, les images sont restituées sans diaphonie.

La technique de codage généralement employée est le multiplexage angulaire. Une équipe de Rockwell en Californie a récemment enregistré 1 000 hologrammes d'images de 320 par 220 pixels dans une couche de 10 mm \times 10 mm \times 1 mm d'un cristal photoréfractif de niobate de lithium. La juxtaposition de 20 couches identiques dans le volume total du cristal de 10 mm \times 10 mm \times 20 mm a conduit à une capacité de 20 000 hologrammes.

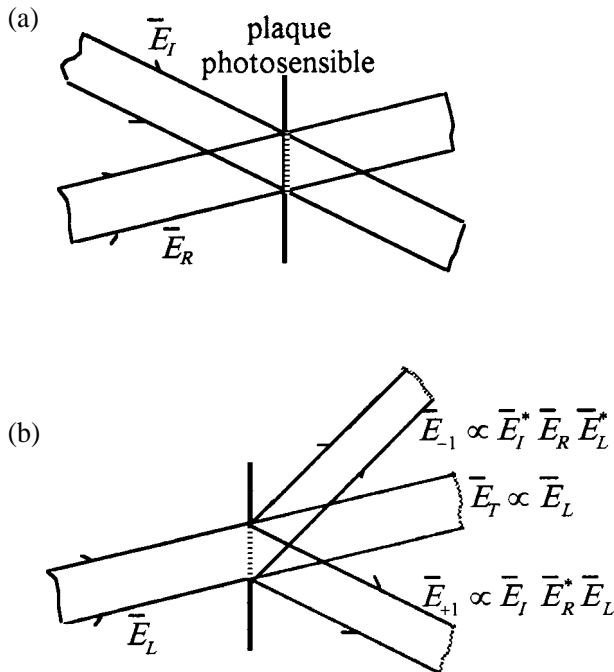


Figure 1 - Écriture a) et lecture b) d'un front d'onde image. Les différentes ondes sont représentées par l'amplitude complexe de leur champ électrique.

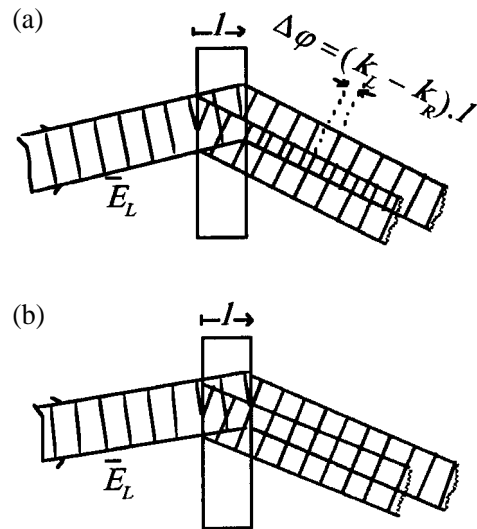


Figure 2 - Relecture d'un hologramme épais. Seules sont représentées les ondes d'ordre +1 diffractées par la première et dernière couche. Les traits fins représentent des plans équiphasés. $\Delta\phi$ représente la différence de phase entre ces deux ondes diffractées. a) relecture hors incidence de Bragg, b) relecture à l'incidence de Bragg.

L'adressage angulaire peut être effectué par des miroirs montés sur des moteurs pas à pas. Mais l'objectif visé – absence de déplacement mécanique – n'est pas alors atteint. Plus attrayante est la technique de déflexion angulaire par des cellules acousto-optiques, malheureusement chères et grosses consommatrices d'énergie. La nouvelle technique que nous proposons, bien que fondée elle aussi sur la sélectivité angulaire de Bragg, fait l'économie des composants défecteurs. Dans l'approche conventionnelle, N directions d'incidence du faisceau référence définissent les N adresses de stockage. Pour ranger une image à l'adresse n , on l'enregistre par inter-

férence avec le faisceau de référence dirigé suivant l'angle d'incidence associé à cette adresse. Au contraire nous proposons d'enregistrer chaque image par interférence *simultanée* du faisceau image avec N faisceaux de référence dirigés suivant les N angles d'incidence précédemment définis et de définir chaque adresse par l'ensemble des phases affectées aux différents faisceaux de référence.

L'enregistrement de la 1^{re} image est illustré sur la figure 1a. Tous les faisceaux sont bien sûr issus de la même source laser. Les composants nécessaires à leur séparation ne sont pas représentés ici. Les faisceaux de

référence sont focalisés sous la forme de points source. Une matrice de modulateurs de phase placée dans ce plan focal permet d'affecter le jeu de phases $(\varphi_1^1, \dots, \varphi_1^n, \dots, \varphi_1^N)$ aux N faisceaux. Après traversée d'une lentille, les faisceaux atteignent le cristal sous la forme d'ondes planes d'amplitudes complexes $\|E_R\| \exp(i\varphi_j^n)$. N hologrammes de l'image sont enregistrés simultanément par interférence entre le faisceau image et chacune des ondes de référence. Les écarts angulaires entre les faisceaux de référence sont assez grands pour que chaque faisceau de référence ne puisse relire que l'hologramme qu'il a enre-

gistré. Lors de la relecture par N faisceaux présents simultanément, apparaissent en sortie N ondes diffractées dans la même direction (figure 1b). Chacune de ces ondes reconstruit à l'identique l'onde image. Le montage est fait de telle sorte qu'elles aient toutes la même amplitude. Comme indiqué plus haut, l'image reconstruite s'exprime en fonction du produit de l'onde de lecture avec le complexe conjugué de l'onde de référence à l'écriture.

Lorsque les phases $(\varphi_1^1, \dots, \varphi_1^N)$ sont identiques à l'enregistrement et à la lecture, la phase φ_1^n du $n^{\text{ème}}$ faisceau de lecture compense exactement la phase $-\varphi_1^n$ portée par l'enregistrement du $n^{\text{ème}}$ faisceau d'écriture. Ainsi, les ondes diffractées interfèrent-elles constructivement. Les informations enregistrées sont alors relues par la caméra mise au point sur le modulateur d'image.

Si, lors de la reconstruction, on modifie les phases relatives des faisceaux de référence en introduisant le nouveau jeu de phase $(\varphi_2^1, \dots, \varphi_2^N)$ au moyen des modulateurs de phase, alors les amplitudes complexes des faisceaux diffractés sont décalées en phase les unes par rapport aux autres d'une quantité $\varphi_2^n - \varphi_1^n$. Au lieu d'être proportionnelle à N , la somme des amplitudes diffractées est maintenant proportionnelle à $\sum_{n=1}^N \exp(i(\varphi_2^n - \varphi_1^n))$. En choisissant correctement ce nouveau jeu de phase, on peut faire en sorte que cette somme soit nulle. Les interférences sont alors totalement destructives et la caméra ne détecte plus aucun signal. Une seconde image peut donc être enregistrée par interférence entre le faisceau image et les N faisceaux de référence ayant les mêmes angles d'incidence que précédemment mais porteurs du nouveau jeu de phase $(\varphi_2^1, \dots, \varphi_2^N)$. Bien que toutes les informations soient superposées dans le matériau, les images peuvent être restituées indépendamment par relecture avec le bon jeu de phase.

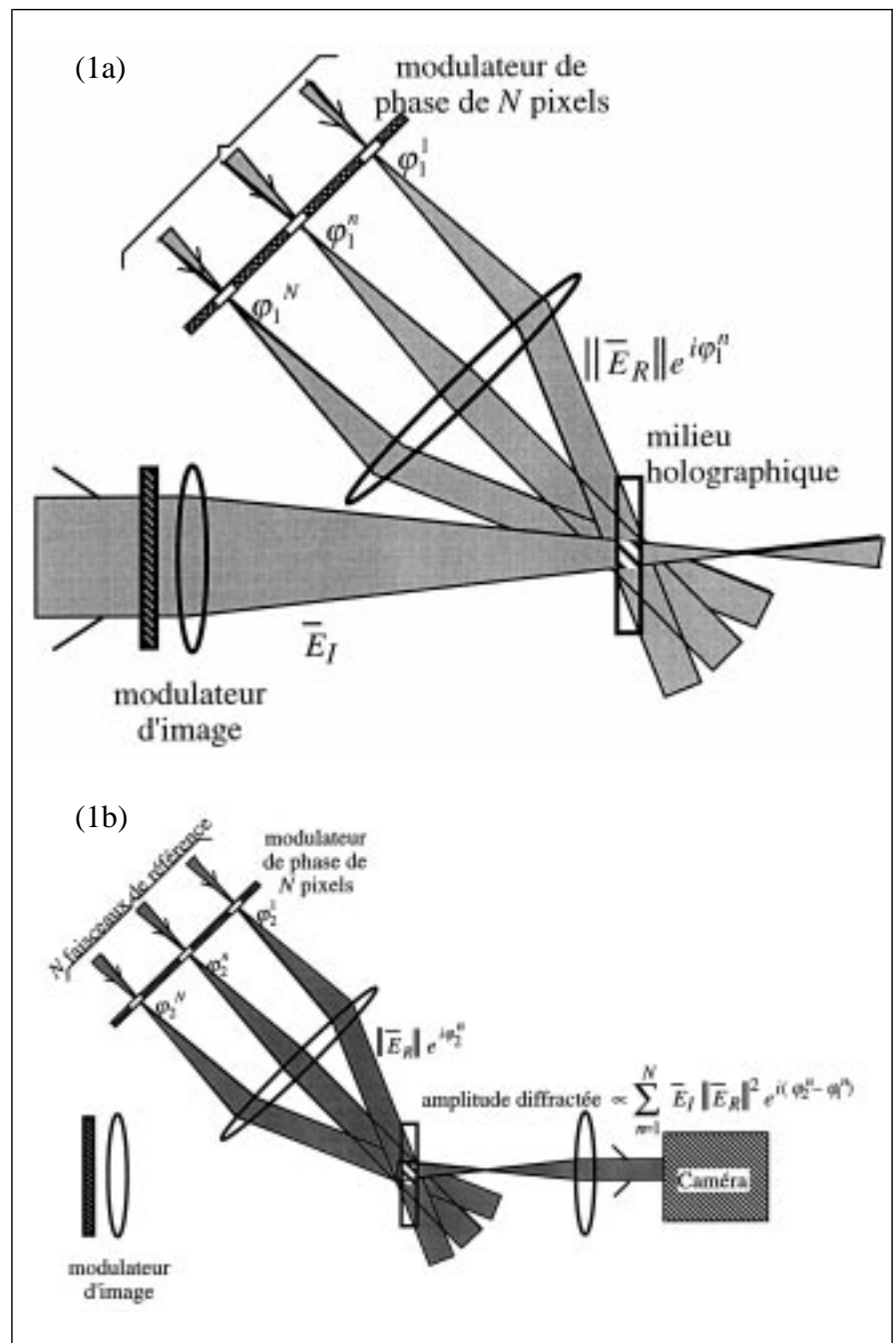


Figure 1 - Schéma de principe de l'enregistrement holographique par codage en phase ; a) écriture d'un hologramme ; b) relecture de l'hologramme.

Avec cette technique, on peut enregistrer autant d'images qu'il existe de vecteurs orthogonaux $(\exp(i\varphi_p^1), \dots, \exp(i\varphi_p^N))$. Si les phases peuvent prendre les deux valeurs 0 et π , pour certaines valeurs particulières de N , telles que toutes les puissances de 2 , on peut enregistrer et reconstruire N images. La capacité est donc en principe exactement la même que celle du multiplexage angulaire.

tement la même que celle du multiplexage angulaire.

Le déflecteur acousto-optique de l'approche conventionnelle est donc remplacé ici par le modulateur de phase pixélisé nécessaire au codage en phase. Il peut s'agir d'une matrice à cristal liquide dont les pixels sont commandés par des ten-

sions de quelques volts. En contrepartie de son moindre coût et de sa moindre consommation d'énergie, cette nouvelle technique requiert un contrôle très précis de la modulation de phase, afin de retrouver les images sans diaphonie.

SUPERPOSITION D'HOLOGRAMMES DANS LES CRISTAUX PHOTORÉFRACTIFS

Différents mécanismes physiques peuvent être utilisés pour enregistrer les hologrammes. Le plus souvent on emploie des cristaux photoréfractifs qui allient une bonne qualité optique à une excellente stabilité temporelle de leurs caractéristiques (voir encadré 2). Les mêmes échantillons fonctionnent encore sans aucune dégradation apparente après plus de 10 ans d'utilisation. Une fois un premier hologramme inscrit, on peut présenter au cristal une seconde figure d'interférence. Le premier hologramme s'effacera pendant que le second se construira. On arrête l'inscription lorsque les efficacités de diffraction des deux hologrammes sont identiques. On peut continuer de la même façon pour enregistrer les N hologrammes. D'autres procédures d'enregistrement sont également possibles, par exemple avec des temps d'inscription identiques pour tous les hologrammes. Néanmoins, quelle que soit la procédure employée, la variation d'indice de chacun des hologrammes est au maximum égale à la variation d'indice maximale que l'on peut induire dans le matériau divisée par le nombre N d'hologrammes. L'efficacité de diffraction décroît donc en première approximation comme l'inverse du carré de N pour N grand. Cette décroissance est une des limites à l'obtention des très hautes capacités. En contrepartie, le temps nécessaire pour inscrire l'ensemble des N hologrammes est le même que celui nécessaire pour inscrire un seul hologramme à saturation. Par exemple pour un

cristal de titanate de baryum dopé au cobalt, $\text{BaTiO}_3:\text{Co}$, à la longueur d'onde de 532 nm et pour une puissance optique de 10 mW/cm^2 , le temps nécessaire pour inscrire un seul hologramme à saturation (avec une variation d'indice de $3 \cdot 10^{-4}$) est d'environ 25 s. Lorsqu'on inscrit 100 hologrammes, le temps nécessaire à la gravure de chacun chute à 250 ms et la variation d'indice associée tombe à $3 \cdot 10^{-6}$.

Les hologrammes peuvent être effacés par un éclairage uniforme du cristal qui est alors prêt à recevoir d'autres données. Il est également possible d'effacer sélectivement une des images enregistrées en éclairant le matériau avec la figure d'interférence utilisée lors de l'enregistrement mais en introduisant un déphasage supplémentaire uniforme de π sur le faisceau image. En contrepartie la relecture des informations est destructive. Différentes parades ont été envisagées. On peut par exemple rafraîchir les données avant leur effacement total ou fixer définitivement les hologrammes par un traitement thermique du cristal.

EXEMPLE DE RÉALISATION

Nous avons construit une telle mémoire pour démontrer la faisabilité du codage en phase. Le modulateur de phase utilisé est une matrice à cristal liquide ferroélectrique de 64 pixels. La figure de phase peut être reconfigurée en moins de 150 μs et la modulation de phase est exactement égale à π à mieux que 1 % près. Avec ce modulateur nous avons pu contrôler la phase de 64 faisceaux de référence et donc enregistrer 64 images dans un cristal photoréfractif. Celui-ci est un cristal de titanate de baryum dopé au fer dont les faces d'entrée et de sortie font $5.2 \times 5.2 \text{ mm}^2$ et dont la profondeur est de 3.6 mm. Le montage est alimenté par une source laser YAG pompée par diode et doublée en fréquence émettant à la longueur d'onde de 532 nm. La puissance op-

tique incidente sur le cristal est de l'ordre de 250 μW soit 3 mW.cm^{-2} . L'enregistrement de l'ensemble des 64 images requiert quelques minutes. Elles sont ensuite relues à la cadence vidéo imposée par la caméra de détection. Sur la colonne de gauche de la figure 2, nous avons reproduit 3 des 64 images transmises, avant enregistrement holographique, directement du modulateur d'image vers la caméra et au travers du cristal photoréfractif. Les images comportent chacune 128×128 pixels binaires de sorte que la capacité de cette mémoire est de 1 Mbit. Après enregistrement de l'ensemble des 64 images, nous avons pu relire ces trois mêmes images avec les faisceaux de référence sur lesquels nous avons mis les adresses de phase qui leur correspondent. Les images reconstruites sont représentées sur la colonne de droite de la figure 2. L'efficacité de diffraction maximale obtenue pour des images entièrement blanches est de 0.1 %. Bien qu'une altération des niveaux blancs et noirs soit observée, un seuil permet de retrouver toutes les données enregistrées. Aucune diaphonie entre les images n'est visible. Ces résultats démontrent la faisabilité et la simplicité de la technique de codage en phase.

Ce montage de démonstration nous a permis de tester nos prédictions et donc d'extrapoler ces résultats à une mémoire de plus haute capacité. Un de nos objectifs est maintenant de construire une mémoire de bien plus haute capacité, 4 Gbit, par codage en phase de 128×128 images comportant chacune 512×512 pixels binaires. Le matériau utilisé sera un cristal photoréfractif de niobate de potassium qui est disponible sous des volumes de plusieurs centimètres cubes. Le temps nécessaire pour enregistrer et reconstruire l'une quelconque de ces images sera limité à quelques dizaines de millisecondes.

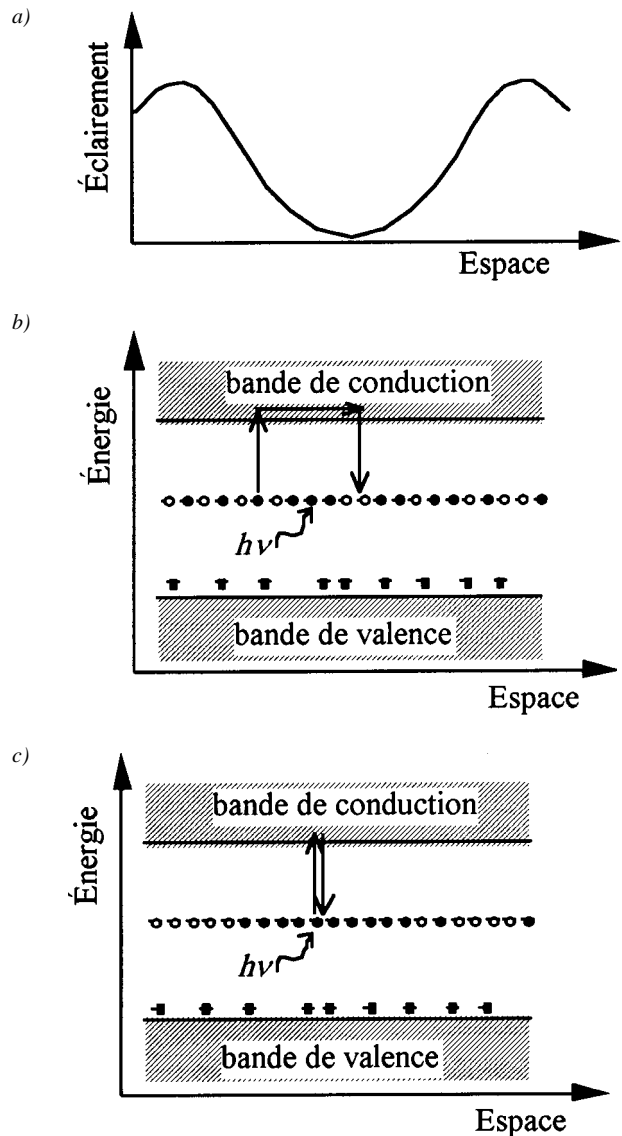
Cet objectif résulte d'un compromis. Il serait facile de diminuer

LES CRISTAUX PHOTORÉFRACTIFS

L'effet photoréfractif apparaît dans certains matériaux photoconducteurs et électro-optiques. Certains sont des semi-isolants tels que le niobate de lithium, le titanate de baryum, d'autres des semi-conducteurs comme l'arséniure de gallium ou le tellurure de cadmium. L'effet est lié à l'existence de centres profonds situés dans la bande interdite (voir figure ci-contre). Certains centres peuvent libérer une charge sous l'effet de la lumière. Nous supposons ici que ces charges sont des électrons et qu'il existe des centres vides susceptibles d'accueillir un électron. Lors d'un enregistrement holographique, le matériau est illuminé par la figure d'interférence. Localement, la densité d'électrons photoexcités est proportionnelle à l'éclairement. Les électrons se déplacent dans la bande de conduction sous l'effet de l'agitation thermique et du champ électrique interne au matériau et finissent par retomber dans des centres vides. Ce processus d'excitation et de recombinaison redistribue ces électrons dans les centres profonds, modifiant la distribution spatiale du champ électrique et, par effet électro-optique linéaire, celle de l'indice de réfraction. Cette réplique de la figure d'interférence constitue l'hologramme de l'image.

Juste après le début de l'illumination, les électrons excités se redistribuent uniformément. La variation d'indice se construit donc proportionnellement au temps. Au fur et à mesure que le champ électrique croît, il s'oppose au déplacement des charges. Pour finir on atteint un état stationnaire pour lequel les électrons retombent quasiment à l'endroit d'où ils ont été excités : la variation d'indice a atteint son maximum δn_{\max} et n'évolue plus. En première approximation, le temps nécessaire pour atteindre cette saturation est inversement proportionnel à l'éclairement. Il est donc possible d'alimenter les montages avec des sources laser peu puissantes et, par là, compactes. L'énergie nécessaire pour atteindre 70 % de δn_{\max} vaut plusieurs $J.cm^{-2}$ pour des matériaux comme le niobate de lithium à la longueur d'onde de 488 nm pour lequel $\delta n_{\max} \approx 10^{-4}$. Elle descend jusqu'à $200 \mu J.cm^{-2}$ environ pour le tellurure de cadmium, qui présente $\delta n_{\max} \approx 10^{-6}$ à 1550 nm.

Une fois les faisceaux éteints, le cristal redevient peu conducteur, ce qui fige la figure de charge. L'hologramme est ainsi mémorisé pour une durée dépendant de cette conductivité dans le noir. Elle est de l'ordre de la seconde, voire moins pour les semi-conducteurs mais peut atteindre plusieurs siècles pour certains semi-isolants. Un éclairement uniforme redistribue aléatoirement les charges et efface ainsi l'hologramme.



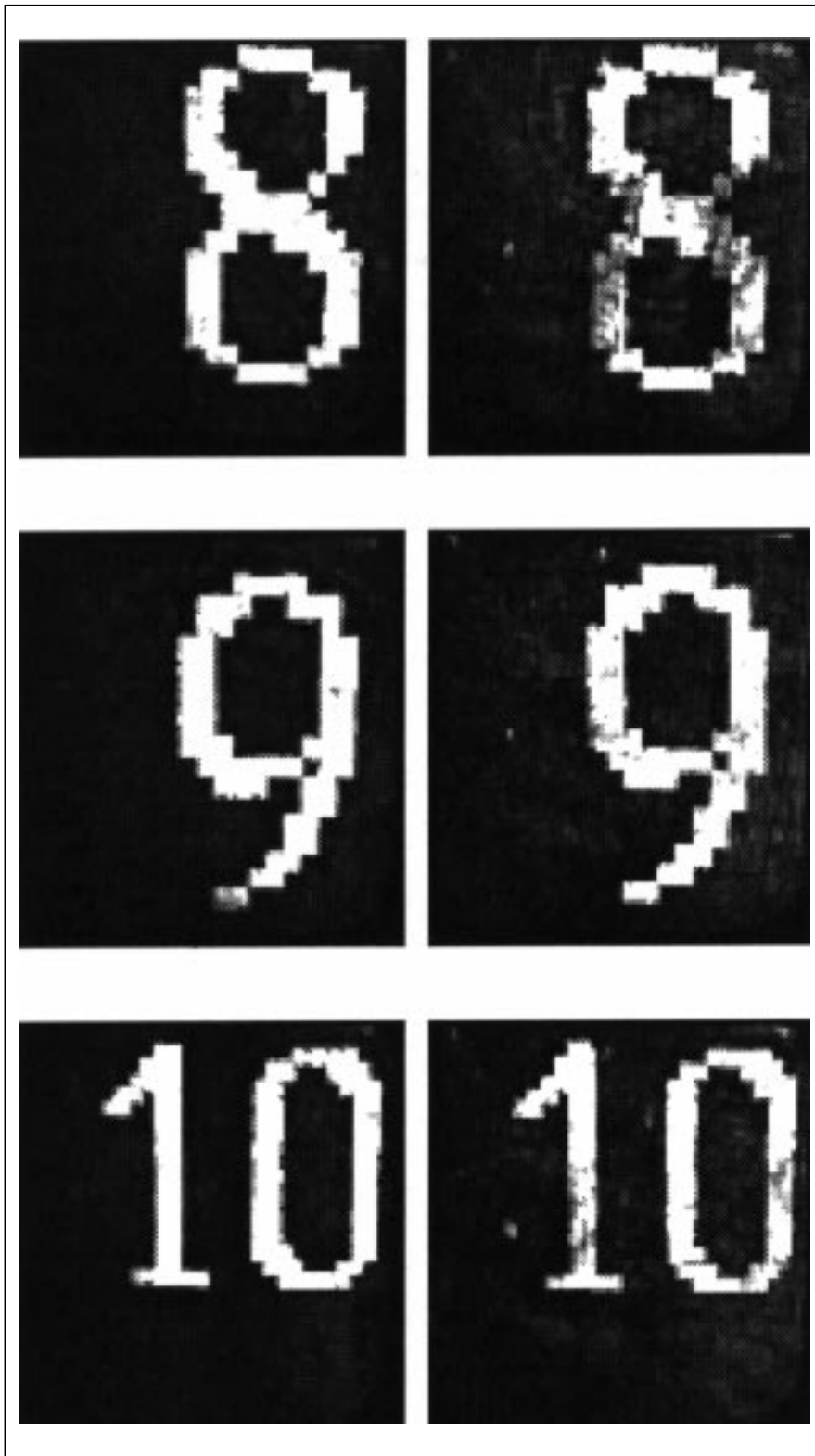


Figure 2 - Trois parmi les 64 images utilisées dans l'expérience de codage en phase. La colonne de gauche représente les images avant leur enregistrement et celle de droite les images reconstruites.

considérablement le temps d'accès aux images et par exemple d'atteindre des temps d'accès de l'ordre de

100 μ s. Néanmoins, il est nécessaire de collecter suffisamment de photons pour reconstruire les données.

Le temps d'accès est donc d'autant plus long que l'efficacité est plus petite. Comme l'efficacité varie en $1/N^2$, on est contraint de trouver un compromis entre le temps d'accès et la capacité de la mémoire.

PERSPECTIVES

En théorie l'holographie de volume autorise de bien plus grandes capacités. Des modulateurs d'image de $10^3 \times 10^3$ pixels seront bientôt disponibles et il est possible d'utiliser simultanément sur un même montage plusieurs techniques de codage, par exemple le codage en phase avec le codage en longueur d'onde. Ainsi, une mémoire holographique de volume à accès sub-milliseconde d'une capacité de 10^{12} bits est, en principe, envisageable. Elle correspondrait par exemple à des images de $10^3 \times 10^3$ pixels enregistrées par 128×128 faisceaux de référence codés en phase et avec l'utilisation de 100 longueurs d'onde différentes. Nous ne savons pas encore parfaitement comment évolue la diaphonie entre les images lorsque la capacité augmente. Sur notre montage cette diaphonie est suffisamment faible pour que le taux d'erreur ne soit pas mesurable. Des études et des expériences de validation sont donc encore nécessaires. De plus, les matériaux existants ne permettent pas d'atteindre ces objectifs. Il est nécessaire d'améliorer, voire de concevoir, de nouveaux matériaux photosensibles, photoréfractifs, photopolymères ou autres. Les efforts doivent porter sur plusieurs points :

- une grande capacité et des débits élevés ne pourront être obtenus que si les variations d'indice importantes sont atteintes. Actuellement les variations d'indice les plus importantes sont atteintes dans le niobate de lithium et le titanate de baryum. Elles restent inférieures à quelques 10^{-4} et sont atteintes pour des géométries (directions de propagation et

polarisations des faisceaux optiques) qui ne correspondent pas aux maxima de capacité. Augmenter ces variations d'indice est un objectif prioritaire;

– cet accroissement de la variation d'indice ne doit pas se faire au détriment de la qualité optique du cristal. Les efficacités de diffraction mises en jeu sont toujours faibles (le plus souvent très inférieures à 10^{-6}) et le signal diffracté doit émerger du bruit optique diffusé par les imperfections du matériau. Cette qualité optique doit être obtenue sur des échantillons de plusieurs centimètres cubes;

– les matériaux photoréfractifs sont des matériaux dynamiques qui permettent d'inscrire, d'effacer et de remettre à jour les données. En contrepartie les informations enregistrées sont volatiles. Les techniques actuellement utilisées pour éviter les pertes de données (rafraîchissement, fixage thermique) ne sont pas satisfaisantes. D'autres solutions sont à considérer. L'écriture des hologrammes par un processus à deux longueurs d'onde, l'une pour

sensibiliser le matériau et la seconde pour inscrire et relire l'hologramme, est envisagée.

CONCLUSION

Par codage en phase on peut construire des mémoires holographiques compactes. Cependant, une seule technique de codage, qu'elle soit angulaire, par longueur d'onde ou en phase, ne permet pas d'atteindre les très hautes capacités voisines de 10^{12} bits. Plusieurs techniques devront être employées simultanément. De même les très hauts débits (1 Gbit/s) et les temps d'accès courts n'ont été obtenus que sur des mémoires de capacité modeste. Il reste encore à démontrer que tous ces avantages peuvent être obtenus simultanément. Si rien ne s'y oppose en théorie, il reste encore de gros efforts de recherche à effectuer sur les architectures et plus particulièrement sur les matériaux d'enregistrement. C'est seulement à l'aboutissement de ces recherches que nous saurons si les mémoires

holographiques de volume tiennent leurs promesses et si elles peuvent se poser en alternative avantageuse par rapport aux autres technologies de stockage.

POUR EN SAVOIR PLUS

Psaltis (D.), Mok (F.), « Holographic Memories », *Scientific American*, pp. 52-58, Novembre 1995.

IBM Holographic Optical Storage Team, « Holographic storage promises high data density », *Laser Focus World*, pp. 81-93, Novembre 1996.

Alves (C.), Pauliat (G.), Roosen (G.), « Dynamic phase-encoding storage of 64 images in a BaTiO₃ photorefractive crystal », *Optics Letters*, vol. 19, pp. 1894-1896, 1994.

Holographic memories with holographic crystals, chap. 11 dans « Insulating materials for optoelectronics », éditeur F. Agullo-Lopez, *World scientific*, 1995.

H. Hong (J.), McMichael (L.), Y. Chang (T.), Gi Paek (E.), « Volume holographic memory systems : techniques and architectures », *Optical Engineering*, vol. 34, pp. 2193-2203, 1995.