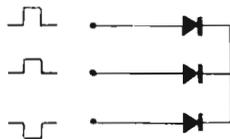
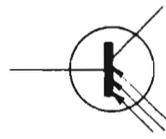


OUI



NON

ET



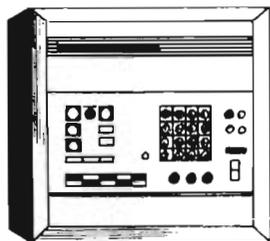
OU

$$1 + 1 = 10$$

$$10 + 10 = 100$$

$$1000 - 100 = 100$$

$$11 \times 11 = 1001$$



# INITIATION AU CALCUL ELECTRONIQUE

## MÉGABITS A LA DEMANDE ..... GRACE AUX HOLOGRAMMES

**I**L existe actuellement des méthodes scientifiques permettant de déterminer la quantité d'informations que peuvent enregistrer les émulsions photographiques.

La comparaison des capacités d'informations des émulsions photographiques et des systèmes à bandes magnétiques fait ressortir un net avantage en faveur des émulsions photographiques.

Les bandes magnétiques utilisées dans les ordinateurs ont une capacité de 10 000 unités d'information par centimètre carré. Or les émulsions photographiques ordinaires peuvent enregistrer 4 à 10 fois plus d'informations que les bandes magnétiques. Et une plaque Kodak Spectroscopic 649, utilisée aussi en holographie, est capable d'enregistrer 7 000 fois plus d'informations que les bandes vidéo : cette plaque enregistre jusqu'à 300 millions d'unités d'information par centimètre carré !

Supposons que l'on veuille enregistrer sur une telle plaque l'ensemble du contenu des bibliothèques du monde entier : cette masse de documents, accumulés depuis que l'écriture existe, représente, d'après les estimations,  $10^{16}$  unités d'information : celles-ci tiendraient sur des plaques Kodak Spectroscopic 649 dont la surface totale serait celle d'un carré de 60 m de côté.

### UNE APPLICATION PLUS REALISTE : LA MEMOIRE DE MASSE

En fait, la plaque devrait trouver des applications bien plus importantes dans les mémoires d'ordinateurs. D'une part pour la constitution de mémoires R.O.M. (Read-Only-Memory : mémoires à lecture seulement) :

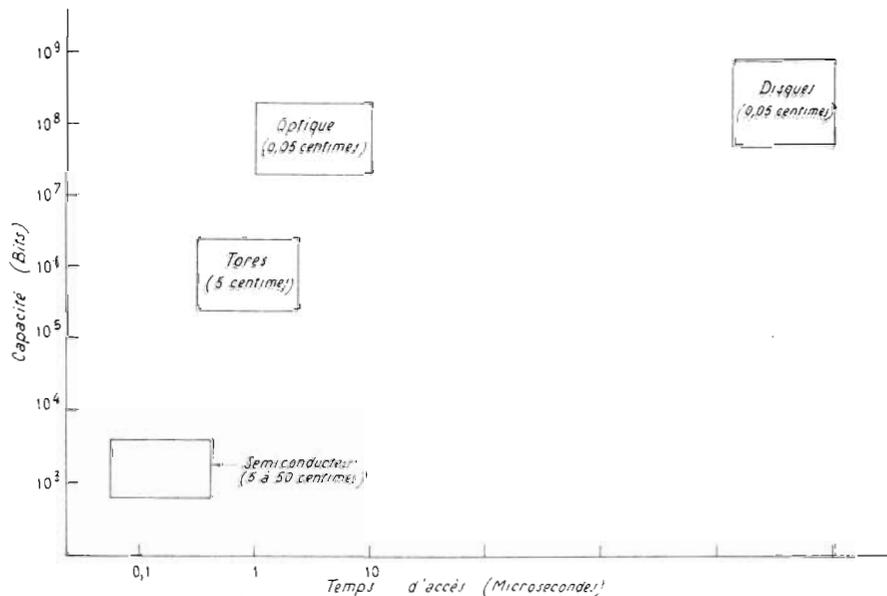


Fig. 1. - Caractéristiques des divers systèmes de mémoire : les mémoires optiques sont les plus rapides, les plus économes et les moins chères.



Photo 1. - Deux déflecteurs acousto-optiques en cascade. Un tel montage permet de dévier le faisceau laser en 1 600 positions différentes, en une microseconde au maximum.

(Cliché Bell Telephone Laboratories.)

d'autre part pour la constitution de mémoires à lecture et écriture.

Deux formes se distinguent essentiellement : les Bell Telephone Laboratories travaillent sur la mise au point de mémoires à lecture seulement, holographiques bien entendu, qui se présenteraient sous la forme de cartes enfichables, contenant, chacune, jusqu'à cent millions de bits d'information et ayant un temps d'accès aléatoire de l'ordre de la microseconde. Les R.C.A. Laboratories, d'autre part, étudient activement des mémoires holographiques imprimées sur des films minces ferromagnétiques.

Les mémoires optiques associent les trois caractéristiques fondamentales : elles sont très rapides et compactes et de plus, leur prix de revient est bon marché relativement aux autres systèmes (Fig. 1). On pourrait ajouter une quatrième propriété : ces mémoires sont simples.

## QU'EST-CE QU'UN HOLOGRAMME ?

Considérons un faisceau de lumière (Fig. 2) traversant une lame semi-transparente. Cette lame a la propriété de ne laisser passer qu'une partie du faisceau et de se comporter pour l'autre partie comme un miroir.

Le faisceau ayant traversé la lame éclaire un objet : chaque point de l'objet éclairé se comporte alors comme une infime source de lumière, émettant un faisceau lumineux dans tous les sens. En particulier une partie du faisceau émis par notre objet rencontre le faisceau réfléchi par la lame semi-transparente.

Dans certains cas, on observe un réseau d'interférences : ces cas se rencontrent en particulier lorsque la source lumineuse est « cohérente » ; c'est là la particularité du faisceau émis par un laser. L'hologramme est l'impression de ce réseau d'interférences.

l'un des petits morceaux, l'objet entier est reconstitué, toujours en 3 dimensions.

On a souvent l'habitude d'« holographier » à l'aide de faisceaux optiques, en utilisant comme support d'hologramme, un film photographique à grain très fin. En fait, un hologramme est un dispositif qui garde en mémoire l'interférence de deux ondes de nature quelconque. L'interférence est un phénomène physique non réservé exclusivement aux ondes lumineuses. On peut créer des interférences entre ondes acoustiques, entre ondes HF ou encore entre micro-ondes. Le support d'hologramme peut être absolument quelconque : à la R.C.A., l'hologramme est constitué par un film de bismuth-manganèse.

### LA MEMOIRE B.T.L. A LECTURE SEULE

La mémoire des Bell Telephone Laboratories consiste essentielle-

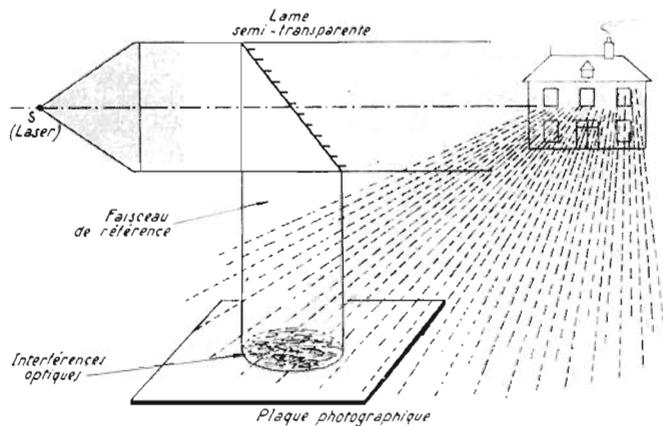


Fig. 2. — Hologramme. La lumière réfléchi par l'objet (ici une maison), interfère avec le faisceau de référence. L'hologramme est un support dans lequel on a mis en mémoire le réseau d'interférences.

A signaler cependant que les hologrammes furent inventés, par Gabor, dix ans avant les lasers. Mais l'introduction des lasers a facilité énormément le travail des chercheurs, ce qui a permis de faire de l'hologramme un produit industriel à part entière.

Une particularité importante : si l'on éclaire l'hologramme avec le même faisceau lumineux ayant servi à le produire, on peut « voir » une image reconstituée en 3 dimensions. D'autre part, l'objet éclairé se comporte comme une infinité de sources lumineuses infimes : cela signifie qu'en chaque point de l'hologramme se trouve un rayon lumineux issu de chacune de ces petites sources. On dit pratiquement que chaque point de l'hologramme contient toutes les informations sur la forme et la position de l'objet : si on découpe l'hologramme en petits morceaux et si on éclaire

ment en un système de déviation d'un faisceau laser (Fig. 3), capable de diriger un faisceau laser en un fond bien déterminé d'une plaque « holographique ». Chaque hologramme contient « une page d'informations » et une fois l'hologramme éclairé ponctuellement, une information est projetée sur un ensemble de photodétecteurs.

Les chercheurs des Bell Telephone Laboratories ont réalisé des « pages » contenant 4 096 spots brillants ou noirs, représentations logiques de 4 096 bits. Les spots sont répartis en blocs de  $8 \times 8$  bits.

Un hologramme consistant en un réseau d'interférences entre un faisceau de référence et un faisceau lumineux provenant d'un objet éclairé, on trouve alors de nombreux avantages à la mémoire holographique : comme chaque point de l'hologramme contient toutes les informations

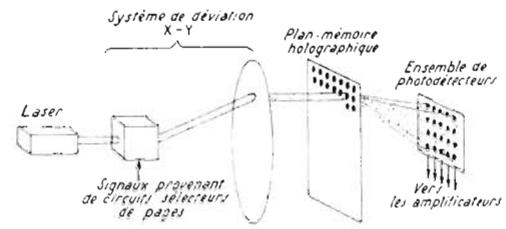


Fig. 3. — Mémoire à carte holographique.

sur l'objet éclairé, on peut conclure que sur chaque point de l'hologramme se trouvera enregistré l'ensemble des 4 096 spots brillants ou sombres représentant l'information à conserver sous forme binaire.

En d'autres termes, chaque spot, chaque bit se retrouve en chaque point de l'hologramme.

La mémoire holographique est alors bien moins sensible à la présence de poussières, ou de défauts de surface du film holographique, que les autres mémoires.

La matrice de photodétecteurs est réalisée en technologie « circuits intégrés ». Le bloc de base est un dispositif beam-lead contenant un ensemble de  $8 \times 8$  phototransistors.

Dans une telle mémoire, la vitesse maximum de lecture est déterminée par la puissance du laser, ma sensibilité des photodétecteurs et par les divers rendements des composants. Prenons par exemple celui où la puissance fournie par le laser est de 0.5 W et la puissance lumineuse arrivant sur les détecteurs est de 5 mW : les phototransistors utilisés requièrent une énergie lumineuse de 0.5 pico Joule pour le seuil de détection de la lumière (le seuil correspond à la détection de  $10^6$  photons) : on trouve alors la vitesse maximum de fonctionnement de  $10^{10}$  bits/seconde (une impulsion lumineuse durant  $10^{-10}$  seconde et ayant une  $0.5 \cdot 10^{-12}$  Joule, a une puissance de  $0.5 \cdot 10^{-12} / 10^{-10} = 5 \cdot 10^{-3}$  W).

Si maintenant le réseau de photodétecteurs contient 10 000 phototransistors, l'un quelconque d'entre eux pourrait être atteint en une microseconde au maximum.

Pratiquement, dans le système des Bell Telephone Laboratories, chaque « page holographique » contient 64 mots de 64 bits chacun. Pour augmenter la vitesse de fonctionnement de la mémoire, le système de détection lit un mot à la fois (donc 64 bits en une seule étape). On atteint alors des vitesses de fonctionnement de 50 Megabits par seconde.

### LE DEFLECTEUR DE LUMIERE

La vitesse d'accès à la page holographique et la quantité d'informations que l'on peut stocker dans l'hologramme sont des fonctions des caractéristiques du déflecteur de lumière. Les seules techniques capables de fournir au système un temps de réponse suffisamment grand (de l'ordre de la microseconde) sont des techniques électroniques (techniques électro-optiques, magnéto-optiques ou acousto-optiques). Pour la plupart de ces techniques, il a été démontré que, dans certaines conditions de fonctionnement, le produit du nombre d'adresses détectables, par la vitesse d'accès à ces adresses, est un nombre constant compris entre 100 et 1 000 adresses par microseconde, selon les conditions de fonctionnement.

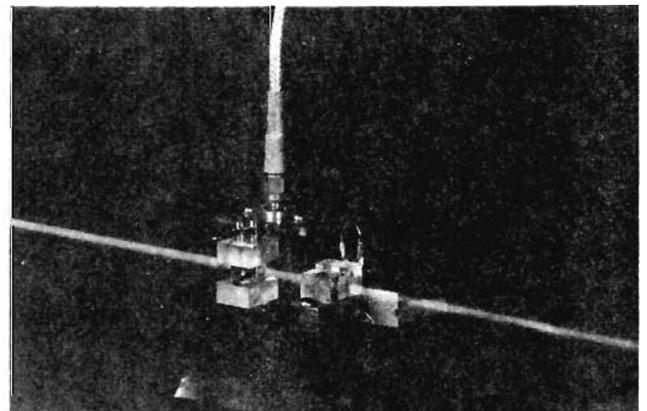


Photo 2. — T.A. Shankoff teste une nouvelle plaque d'hologramme, capable de stocker  $10^8$  bits d'information.

(Cliché Bell Telephone Laboratories.)

Pratiquement, ce résultat signifie qu'en mettant en série deux déflecteurs orthogonaux, on pourrait atteindre un ensemble de 10 000 à 1 000 000 d'adresses, avec un temps d'accès d'une microseconde.

Les chercheurs des Bell Telephone Laboratories ont, dans leur expérience, fait appel à des déflecteurs acousto-optiques, dont le principe est basé sur la diffraction de Bragg. Un transducteur est alimenté par un oscillateur et une onde ultrasonore est ainsi créée dans un milieu transparent. C'est cette onde ultrasonore qui est responsable de la déviation de la lumière incidente, d'un

holographique de 7 cm de côté contient plus de quatre millions de bits.

Les hologrammes constituent des mémoires à lecture seulement. Une fois l'hologramme réalisé, il n'est plus possible d'écrire d'informations. On peut seulement lire l'information qu'il contient.

La fabrication est une étape entièrement automatisée relativement rapide : un hologramme contenant quatre millions de bits se fabrique en une heure et demie.

Cette technologie devrait pouvoir être étendue vers des capacités plus importantes : des cartes contenant cent millions de bits sont d'ores et déjà concevables.

cer ou écrire une information. Un certain nombre de matériaux semblent répondre à la question : les matériaux photochromes, les matériaux ferroélectriques, les films ferromagnétiques et les matières thermoplastiques.

Les substances photochromes semblent être promises à un avenir important. Ce sont des produits qui changent de couleur sous l'effet d'un rayonnement optique, et qui retrouvent leur teinte originale après avoir subi un rayonnement d'une autre longueur d'onde.

Certains cristaux ferroélectriques — le niobate de lithium par exemple — peuvent présenter des variations localisées de l'indice de réfraction après avoir été éclairés par un faisceau laser suffisamment intense. Les hologrammes réalisés en utilisant des cristaux ferroélectriques sont effacés thermiquement.

Les hologrammes formés dans des substances photochromes ou dans des cristaux ferroélectriques présentent une particularité fondamentale : l'image initiale n'est reconstituée que lorsqu'ils sont éclairés exactement avec la même incidence du faisceau laser que l'incidence utilisée lors de la fabrication de l'hologramme. Ce phénomène peut être mis à profit pour accroître considérablement la capacité de la mémoire : il suffit d'enregistrer plusieurs hologrammes sous diverses incidences ; une telle mémoire « en trois dimensions » pourrait alors stocker jusqu'à  $10^{12}$  — un billion — de bits par centimètre-cube de matière ! (Fig. 4). En supposant que l'on n'emploie pas toutes les possibilités offertes par ce type de mémoire, on pourrait néanmoins stocker au moins  $10^9$  bits/cm<sup>3</sup> de matière !

Les hologrammes sont « écrits » dans le film mince de bismuth-manganèse par le procédé dit d'écriture au point de Curie : on envoie un faisceau lumineux sur le film dont l'épaisseur n'excède pas 600 angströms (soit 0,06 micron) pour l'échauffer localement. L'augmentation de température transforme le matériau en un matériau paramagnétique, c'est-à-dire très faiblement magnétique. Lorsque l'on n'éclaire plus le film, celui-ci se refroidit et retourne à son état initial ferromagnétique (état magnétique très fort), mais la direction d'aimantation est inversée par rapport à la direction observée avant l'échauffement.

Le fait d'avoir renversé l'état d'aimantation signifie que l'on a écrit une information dans le film.

Si maintenant on fait interférer deux faisceaux de lumière cohérente sur le film, on crée des zones chaudes et des zones froides correspondant au réseau d'interférences. Ce réseau d'interférences s'imprime alors automatiquement dans le film de bismuth-manganèse.

La densité d'information stockée est très grande : jusqu'à 2 000 raies du réseau d'interférences peuvent être imprimées sur un millimètre de matériau. La vitesse d'écriture dans une telle mémoire n'est que de 20 nanosecondes, tandis que la lecture prend approximativement 20 microsecondes !

Le fonctionnement de la mémoire RCA ressemble, dans son ensemble à celui de la mémoire Bell Telephone Laboratories : Le faisceau laser traverse un déflecteur pour être dirigé vers une adresse de l'hologramme ; la lecture se fait par un réseau de photodétecteurs. Pour l'écriture, le faisceau laser est séparé en deux parties à la sortie du déflecteur : l'une joue le rôle de faisceau de référence, tandis que l'autre partie entre dans un réseau bidimensionnel de modulateurs de lumière (c'est l'étape dite de « composition de page »), puis est dirigée sur le milieu de stockage où elle interfère avec le faisceau de référence (Fig. 5). Ce réseau d'interférence est mis en mémoire dans le film de bismuth-manganèse.

Pour effacer le contenu de la mémoire, donc détruire l'hologramme, un champ magnétique

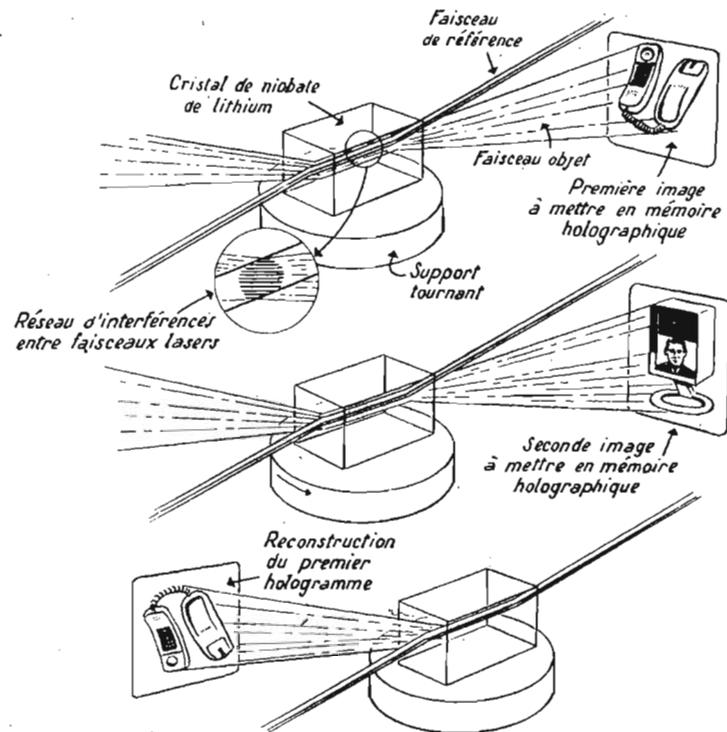


Fig. 4. — Stockage d'hologrammes dans un cristal de niobate de lithium : il suffit de changer l'angle d'incidence (donc de faire tourner très légèrement le cristal) pour enregistrer une suite d'hologrammes.

### LES MEMOIRES A LECTURE ET ECRITURE

L'intérêt d'une mémoire à lecture seulement, à cartes holographiques interchangeables, est évident : il suffirait de changer de carte pour faire faire autre chose à l'ordinateur. Néanmoins, s'il était possible d'écrire sur la carte des informations supplémentaires, des résultats importants de calcul, on disposerait alors dans l'ordinateur de banques de données volumineuses, en perpétuelle évolution.

Eventuellement, on pourrait même accepter, à la rigueur, un processus d'écriture relativement lent : la mémoire serait une mémoire à lecture essentiellement, mais non plus à lecture seulement.

Il est donc nécessaire de trouver un milieu qui soit réversible, sur lequel on puisse à la fois lire, effa-

angle dépendant de la fréquence de l'onde ultrasonore.

Le milieu actif est l'acide iodique et cristallin, tandis que le transducteur créant les ondes ultrasonores dans ce milieu est à base de niobate de lithium. La gamme de fréquence couverte est de 90 à 180 MHz. Un dispositif électronique associé permet de dévier le faisceau incident en l'une des 64 positions prévues, en moins d'une microseconde et demie (photo 2).

### CENT MILLIONS DE BITS AU CM<sup>2</sup>

La densité d'informations que l'on peut enregistrer sur les hologrammes est très grande : jusqu'à 1 bit sur un carré ayant une longueur d'onde de côté, ce qui représente une densité de  $10^8$  bits/cm<sup>2</sup>. En pratique, on n'excèdera jamais  $10^6$  bits/cm<sup>2</sup>. Dans ces conditions, une carte

### LES MEMOIRES RCA

Les chercheurs de la RCA poursuivent leurs travaux dans une voie différente de celle des chercheurs des Bell Telephone Laboratories : Le milieu dans lequel l'information est stockée est un composé de bismuth-manganèse, matériau anisotrope caractérisé par la présence d'un « axe aisé » (lorsqu'il se trouve déposé en couche mince) et par un fort effet magnéto-optique.

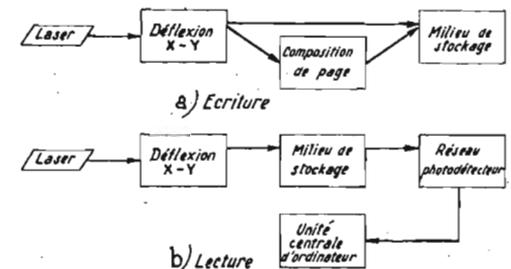


Fig. 5. — Principe de la mémoire holographique RCA

externe, suffisamment intense, est appliqué pour saturer le film. On peut encore chauffer l'hologramme au-dessus de la température de Curie en présence d'un champ magnétique externe : quand le film se refroidit, il ne présente plus qu'une seule direction d'aimantation.

### LE « COMPOSEUR DE PAGE »

Un élément nouveau est entré dans la mémoire RCA : l'écriture au moyen du « composeur de page ». Ce dispositif transforme les signaux électriques en onde lumineuse à modulation spatiale. Mais comme tout l'hologramme doit être enregistré en une seule étape, il faut construire un « composeur » capable d'agir sur tout l'hologramme ; deux solutions se présentent : les éléments du composeur de page sont des dispositifs-série (ils acceptent les informations au fur et à mesure de leur arrivée) ou des dispositifs parallèles (les informations qui doivent servir à la modulation sont stockées dans une mémoire spéciale tampon puis sont délivrées toutes en même temps au moment de l'arrivée de l'impulsion lumineuse ; le composeur joue le rôle de modulateur de lumière).

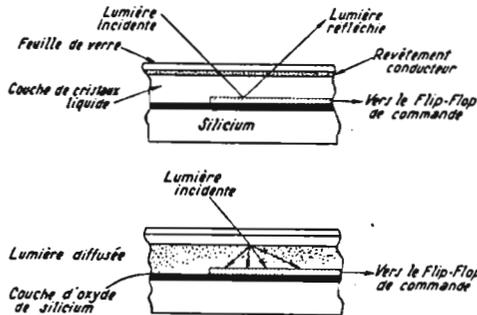


Fig. 6. — Le modulateur à cristaux liquides : le faisceau lumineux incident peut soit traverser les cristaux liquides comme n'importe quel milieu transparent, soit encore diffuser dans la couche de cristaux liquides lorsque l'on applique une tension sur l'électrode.

composeur parallèle) on fait appel aux cristaux liquides sématiques. Ce sont des substances ayant la consistance des bougies et qui ont la propriété de passer par toutes les couleurs de l'arc-en-ciel dans une certaine gamme de températures. Pratiquement une cellule de composeur se compose d'un circuit intégré, contenant un flip-flop et un circuit d'adressage, d'une électrode de contrôle en aluminium qui porte une tension électrique égale soit à  $-20\text{ V}$  soit à  $0\text{ V}$  et enfin d'une couche de cristaux liquides, étalée sur tout le circuit. Une feuille de verre recouvre l'ensemble ; la face du verre au contact de la couche de cristaux liquides est recouverte d'un matériau transparent mis à la terre (Fig. 6).

Si la tension sur l'électrode de commande est de  $-20\text{ V}$ , le faisceau lumineux incident ne ressort pas de la cellule ; la lumière est diffusée au sein de la couche de cristaux liquides. Vue de la plaque holographique, la cellule apparaît ainsi transparente ou opaque selon qu'une tension est — ou non — appliquée sur l'électrode.

Le défaut essentiel des cellules à cristaux liquides est leur lenteur : leur vitesse de basculement de l'état transparent opaque coloré est supérieure à la milliseconde.

### DES DETECTEURS A CRISTAUX LIQUIDES

La cellule précédente à cristaux liquides pourrait également jouer un rôle important dans le réseau détecteur, à la lecture de l'information. Il suffit de remplacer l'électrode de contrôle en aluminium par une anode de photodiode, qui agit comme une surface réfléchissante. L'image projetée par le milieu de stockage frappe la diode et le photo-courant créé sert à piloter le flip-flop.

En somme, la même cellule sert dans les stades d'écriture et de lecture d'une mémoire holographique ; son nom : un latrix (light-accessible transistor matrix)... un composant dont on aura à reparler dans les années à venir !

Marc FERRETTI.

Les céramiques ferroélectriques (titanate de plomb-zirconium) sont des matériaux bien adaptés pour la constitution d'éléments série. Les céramiques sont à la fois ferroélectriques et électro-optiques et stockent les informations sous la forme de charges induites. Bien que cette technique semble pleine de promesses les difficultés sont vite apparues : la fatigue due aux commutations répétées a entraîné des dégradations tant optiques qu'électriques du matériau.

Une autre possibilité de matériau pour un composeur-série est le grenat de gadolinium-fer. Néanmoins on ne sait pas encore réaliser de cristaux suffisamment grands pour en faire un matériau des mémoires holographiques.

Pour mettre en œuvre le second type de composeur de page (le

# CARACTÉRISTIQUES DES SEMI-CONDUCTEURS EUROPÉENS 1971

Ouvrage réalisé par  
**Pro Electron**

Association Internationale des constructeurs

## 6.000 TYPES DÉCRITS :

- codes de désignation
- caractéristiques
- correspondances entre marques
- dessins des boîtiers
- liste des fabricants

► **complet** ► tous les fabricants européens y ont participé

► **fiable** ► établi sur éléments des constructeurs

► **à jour** ► éléments réunis en février 1971

Ouvrage annuel de 300 pages  
Français-Anglais-Allemand  
Format 21 x 29.7  
Prix franco : 96,75 F. ttc  
spécimen sur demande

**BON de commande à adresser à :**

**TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR**

123, rue d'Alésia,  
Paris 14<sup>e</sup>

Veillez m'adresser l'ouvrage "Caractéristiques des Semi-Conducteurs Européens 1971" Veillez trouver ci-joint un chèque de 96,75 francs

NOM .....

ADRESSE .....

VILLE .....

Date : .....

Signature : ..... /HP