HAL
open science

Contribution à l'étude des mémoires holographiques à accès aléatoire

Jean-Pierre Huignard

To cite this version:

Jean-Pierre Huignard. Contribution à l'étude des mémoires holographiques à accès aléatoire. Optique [physics.optics]. Université Paris Sud - Paris XI, 1974. Français. NNT : . pastel-00739750

HAL Id: pastel-00739750

https://pastel.hal.science/pastel-00739750

Submitted on 8 Oct 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THOMSON-CSF
L C R

N° d'ordre

THÈSE

présentée

A L'UNIVERSITÉ DE PARIS-SUD
CENTRE D'ORSAY

pour obtenir le grade de

DOCTEUR INGÉNIEUR

par

Jean-Pierre **HUIGNARD**

SUJET : **Contribution à l'étude des mémoires holographiques à accès aléatoire.**

Soutenue le *devant la Commission d'Examen*

JURY

MM. A. MARECHAL *Président*

S. LOWENTHAL
F.H. RAYMOND
E. SPITZ
} *Examinateurs*

THOMSON-CSF

L C R

Je tiens à remercier Monsieur le Professeur MARECHAL, Directeur Général de l'Institut d'Optique qui nous a fait l'honneur de présider le jury.

Je remercie Monsieur S. LOWENTHAL, Professeur à la Faculté des Sciences, et à l'Institut d'Optique, qui a bien voulu superviser ce travail et nous faire part de ses suggestions.

Je remercie Monsieur RAYMOND, Directeur Technique de l'Informatique à la Direction Technique Générale THOMSON-CSF pour sa participation au jury et pour l'intérêt qu'il a porté au sujet.

Que Monsieur SPITZ, Chef du Groupe "Dispositif et Système" au Laboratoire Central de Recherches THOMSON-CSF, veuille bien trouver ici l'expression de notre plus profonde gratitude. Il a été l'initiateur du sujet de recherches, nous a constamment encouragé et conseillé au cours de ce travail.

Je remercie tous les membres du Laboratoire d'Optique Cohérente pour le soutien amical et fructueux qu'ils m'ont apportés.

Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur d'AURIA avec lequel nous avons fait équipe tout au long de ce travail, ainsi que Madame ROY pour sa contribution à la réalisation des lentilles holographiques.

Je remercie Madame BEGGS et Mademoiselle CAUWET qui se sont chargées, avec patience, de la dactylographie.

THOMSON-CSF 73-113/R/G.5

L C R

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES MEMOIRES HOLOGRAPHIQUES A ACCES ALEATOIRE

INTRODUCTION

I - PRINCIPES GENERAUX CONCERNANT L'ORGANISATION D'UNE MEMOIRE HOLOGRAPHIQUE

II - ENREGISTREMENT HOLOGRAPHIQUE

II.1 - Hologramme de Fresnel

II.2 - Hologramme de Fourier

II.3 - Composition des pages. Dispositifs d'enregistrement et de lecture du plan mémoire

III - ORGANISATION GENERALE D'UNE MEMOIRE MORTE R.O.M. (Read Only Memory).

III.1 - Dispositifs d'enregistrement du plan mémoire

III.1.1 - Enregistrement par translation de l'objectif d'éclairage

III.1.2 - Composition des pages

III.2 - Lecture du plan mémoire

IV - ORGANISATION GENERALE D'UNE MEMOIRE INSCRIPTIBLE ET EFFACABLE

IV.1 - Dispositif d'enregistrement du plan mémoire par utilisation d'un réseau de lentilles

V - ETUDE PARTICULIERE DE L'ENREGISTREMENT HOLOGRAPHIQUE D'UN PLAN DE DONNEES BINAIRES

V.1 - Calcul de la figure de diffraction du plan de données

V.2 - Enregistrement des hologrammes par défocalisation du spectre

V.3 - Enregistrement des hologrammes par utilisation d'une grille de phase

V.4 - Diverses méthodes permettant de réaliser un déphasage aléatoire entre chaque bit d'information du plan objet.

V.5 - Relation entre le nombre de points dans l'image et le diamètre de l'hologramme. Résultats expérimentaux

VI - CAPACITE D'UNE MEMOIRE HOLOGRAPHIQUE ORGANISEE PAR PAGES

VI.1 - Notations utilisées
VI.2 - Capacité de la mémoire. Applications numériques
VI.3 - Angles de diffraction correspondants
VI.4 - Influence des angles de diffraction sur la forme des bits dans l'image
VI.5 - Adaptation du bit elliptique à la matrice de détecteurs. Calcul de l'ellipticité tolérable
VI.6 - Calcul du nombre de points indépendants dans l'image
VI.7 - Compensation de la loi de variation
VI.8 - Capacité de stockage d'un plan infini
VI.9 - Conclusions relatives à l'étude de la capacité

VII - ORGANISATION ETUDIEE AU LABORATOIRE

VII.1 - Description
VII.2 - Caractéristiques géomètriques du montage réalisé
VII.3 - Stockage holographique dans les matériaux épais par rotation de l'onde de référence
VII.4 - Dispositif de déflexion acousto-optique permettant la rotation de l'onde porteuse
VII.5 - Dispositif de déflexion électro-optique permettant la rotation de l'onde porteuse

VIII - ETUDE PARTICULIERE DES DIFFERENTS COMPOSANTS DE LA MEMOIRE

VIII.1 - Déflecteur acousto-optique
VIII.1.1 - Relations donnant le nombre de points
VIII.1.2 - Adaptation du déflecteur auc caractéristiques géomètriques du plan mémoire
VIII.1.3 - Caractéristiques du déflecteur X-Y utilisé
VIII.2 - Matériaux photosensibles
VIII.2.1 - Matériaux non reversibles

VIII.2.2 - Matériaux reversibles

VIII.2.3 - Utilisation du stockage tridimensionel dans les ferroélectriques par rotation de l'onde porteuse

VIII.2.4 - Conclusions relatives aux matériaux photosensibles

VIII.3 - Composants optiques

VIII.3.1 - Objectifs d'adressage du plan mémoire

VIII.3.2 - Réseau de lentilles

VIII.3.3 - Fabrication de lentilles holographiques synthétiques

VIII.3.4 - Résulats expérimentaux

VIII.4 - Composeur de pages

VIII.4.1 - Principe de fonctionnement

VIII.4.2 - Imageur ferroélectrique PLZT

VIII.4.3 - Imageur à déflexion de membrane

CONCLUSION

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES MEMOIRES HOLOGRAPHIQUES A ACCES ALEATOIRE

INTRODUCTION

Un matériau photosensible dont la résolution est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde optique constitue un support de haute densité d'information pour le stockage de données binaires ou analogiques. Un bit d'information pouvant être stocké par un élément de surface dont la dimension minimum est égale au carré de la longueur d'onde, la densité potentielle permise par un tel support est de l'ordre de 10^8 bits/cm^2. Cette densité permet donc la réalisation de mémoires optiques de grandes capacité ($C > 10^{10}$ bits) à accès aléatoire ou séquentiel rapide.

L'introduction de ce nouveau type de technologie semblant particulièrement intéressante dans la mesure où l'on saura dépasser de plusieurs ordres de grandeur les performances (capacité et temps d'accès) des systèmes existants (bande - disques magnétiques) ou en cours de développement (mémoire à semi-conducteur), nous avons été amenés à définir l'organisation d'une mémoire optique à accès aléatoire, inscriptible et effaçable et dont la capacité puisse atteindre 10^{11} - 10^{12} bits avec un débit de lecture de l'ordre de 0,1 à 1 Gbits/seconde. Afin de satisfaire à ces différents objectifs : capacité, temps d'accès et débit d'information, le plan mémoire est divisé en blocs d'information projetant une image de 10^3 ou 10^4 bits sur la matrice de photodétecteurs servant à la lecture. L'accès aléatoire est obtenu en quelques microsecondes par déflexion acousto-optique d'un faisceau laser.

L'utilisation d'un codage de l'information sous forme holographique à l'enregistrement permet à la lecture, la projection d'images stigmatiques sur la matrice de détection. On s'affranchit donc de tous les problèmes d'aberrations rencontrés dans toute autre configuration utilisant des éléments optiques classiques pour la formation des images. Dans ce cas la résolution dans l'image n'est

donc limitée que par la pupille de l'hologramme. Ce codage sous la forme d'un réseau de franges d'interférences complexe permet également une plus grande tolérance aux micro-défauts locaux du matériau photosensible. De tels défauts affectent uniquement la qualité globale du bloc restitué. Ces différentes propriétés caractéristiques du stockage holographique (stigmatisme des images, redondance de l'information), ainsi que la possibilité de multiplexage par rotation de l'onde de référence dans les nouveaux matériaux photosensibles épais (ferroélectriques) font que ce mode de codage est particulièrement bien adapté à la réalisation de mémoires de masse à accès aléatoire.

La présentation des travaux se fera dans la forme suivante :

- Les chapitres I et II concernent le mode de fonctionnement d'une mémoire holographique à accès aléatoire ainsi que la méthode d'enregistrement adoptée pour les pages d'information (holographie de Fourier).
- Les chapitres III et IV concernent l'organisation générale d'une mémoire holographique inscriptible et effaçable.
- Les chapitres V et VI sont consacrés à l'étude de la figure de diffraction d'un plan de données binaires et à l'étude théorique de la capacité.
- Les chapitres VII et VIII concernent l'organisation d'une mémoire holographique tridimensionnelle permettant la superposition des blocs d'information par rotation de l'onde de référence dans un milieu photosensible épais ainsi que la présentation de différents composants : déflecteur - matériaux photosensibles, composeur de pages et composants optiques.

I - PRINCIPES GENERAUX CONCERNANT L'ORGANISATION D'UNE MEMOIRE HOLOGRAPHIQUE

Le schéma de principe d'une mémoire holographique à accès aléatoire donné par SMITS et GALLAHER (1) puis repris par les auteurs des références 2, 3, 4, 5 est rappelé sur la figure 1.

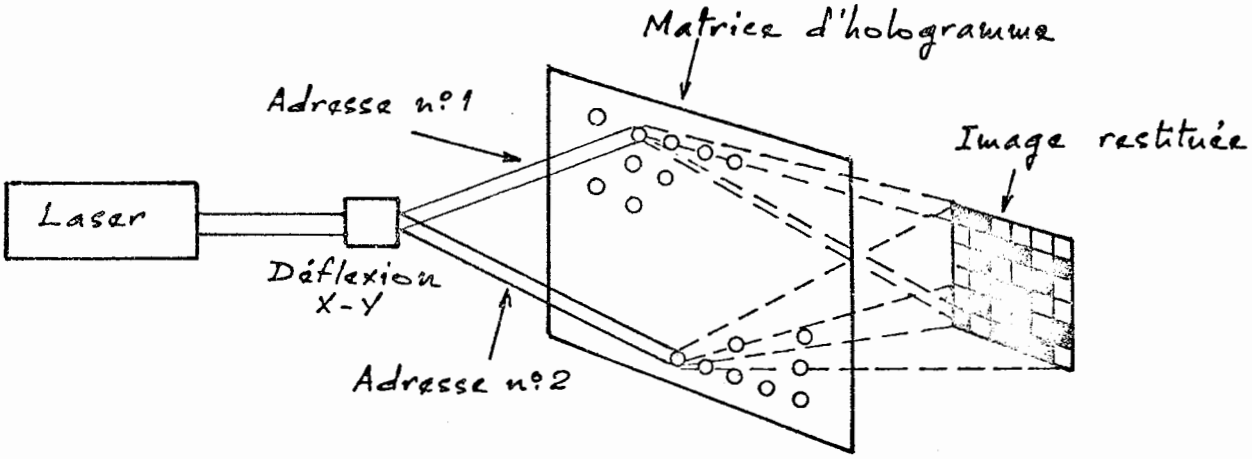


Figure 1

L'adressage est réalisé par déflexion X-Y d'un faisceau laser ; le plan mémoire est composé d'une matrice de M hologrammes (diamètre de l'ordre de 1 mm) contenant N bits d'informations.

Quelle que soit l'adresse choisie sur le déflecteur, l'image restituée se fait sur une matrice de N photodétecteurs servant à la lecture de l'information. La capacité mémoire obtenue est donc le produit C = M x N.

L'organisation d'une mémoire holographique fait donc intervenir deux dispositifs ayant des fonctions parfaitement distinctes :

a) - Un système d'enregistrement de la matrice d'hologrammes, chaque hologramme possédant la propriété de restituer une image fixe sur la matrice de détection quelle que soit l'adresse choisie sur le déflecteur à la lecture.

b) - Un système de lecture du plan mémoire dans lequel l'image réelle se projette sur une matrice de photodétecteurs.

Le schéma de principe du système de lecture est indiqué sur la figure 1.

Le laser, le déflecteur X-Y, le plan mémoire et la matrice de détection en constituent les principaux composants.

La conception du système d'enregistrement est beaucoup moins évidente. En effet nous allons montrer qu'elle est directement liée au mode d'enregistrement adopté pour les pages holographiques (holographie de Fresnel, ou de Fourier) et au type de mémoire à réaliser (mémoire morte - mémoire inscriptible et effaçable).

II - ENREGISTREMENT DES HOLOGRAMMES

On envisagera successivement deux types classiques d'enregistrement : Holographie de Fresnel avec diffuseur pour l'éclairage de l'objet ; Holographie du type Fourier.

II.1 - Hologramme de Fresnel

L'objet constitué par une transparence photographique binaire de 10^4 bits par exemple, est éclairé à l'aide d'un diffuseur (figure 2).

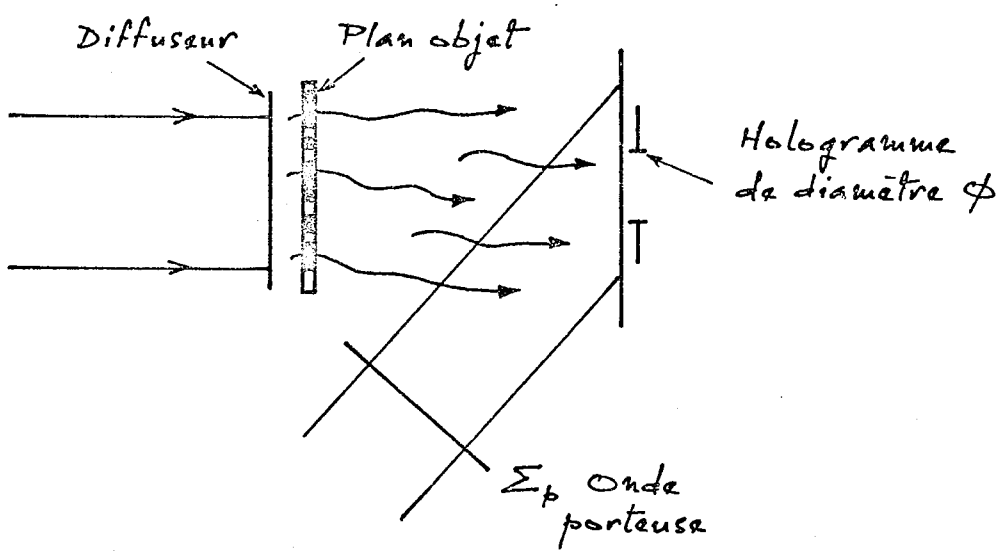


Figure 2

Cette méthode utilisant un éclairage diffus permet d'obtenir dans le plan de l'hologramme un réseau de franges dont l'intensité pratiquement uniforme, est largement compatible avec la dynamique du matériau d'enregistrement. Si par

conséquent les effets de non linéarité sont faibles, cette méthode fournit une mauvaise qualité d'images lorsque le diamètre de l'hologramme devient faible (de l'ordre de 1mm). Le bruit dans l'image devient dans ce cas important vis à vis des bits d'informations (effet de "Speckle"). Cette méthode d'enregistrement est donc à exclure pour l'application envisagée.

II.2 - Hologramme du type Fourier

Le plan de données est dans ce cas éclairé à l'aide d'une onde sphérique Σ_s . Dans le plan focal π de l'objectif on obtient à un facteur de phase près la transformée de Fourier du plan objet. L'adjonction d'une onde porteuse inclinée Σ_p permet l'enregistrement de l'hologramme (figure 3).

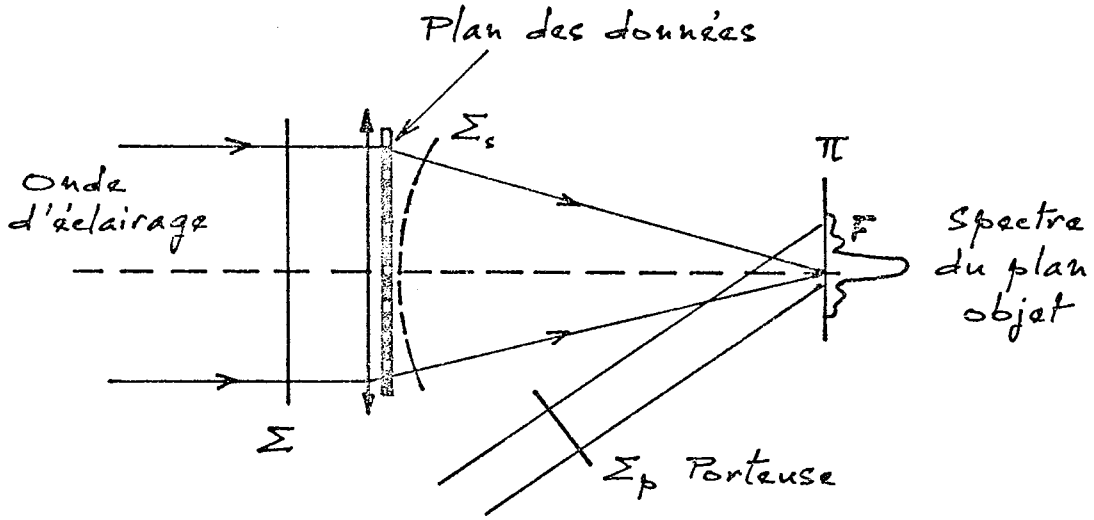


Figure 3

Dans ce cas la plus grande partie de l'énergie diffractée se trouve donc concentrée autour du point F, régions correspondant aux faibles fréquences spatiales de l'objet. Pour un matériau photosensible ayant une dynamique limitée il est donc impossible d'enregistrer simultanément l'information relative aux

basses et hautes fréquences spatiales de l'objet.

Cette méthode fournit une bonne qualité d'image pour un diamètre faible de l'hologramme à condition d'uniformiser l'énergie dans le plan de l'hologramme. Un certain nombre de solutions ont donc été proposées afin de mimiser les effets de non-linéarité : grille de phase aléatoire superposée au plan objet ou défocalisation du spectre.

En vue d'une application mémoire, le mode d'enregistrement à utiliser est donc l'enregistrement de l'information sous forme "d'hologrammes de Fourier".

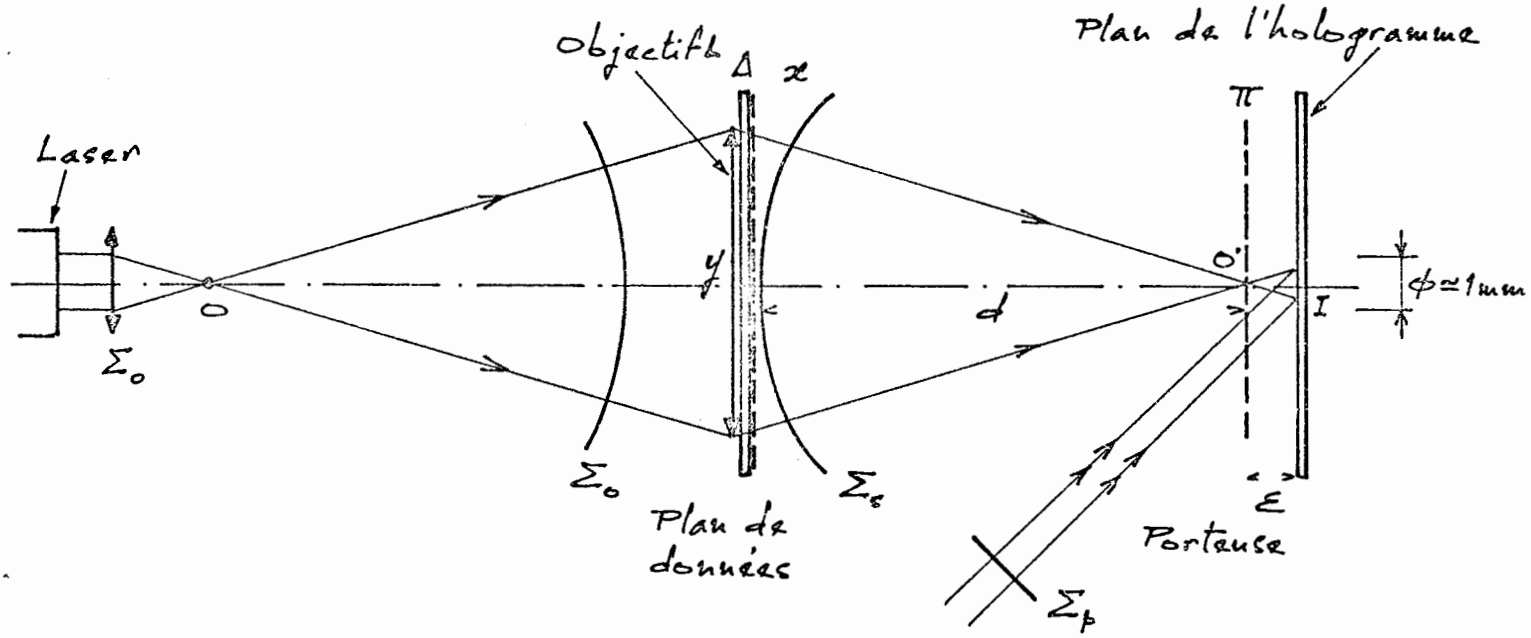


Figure 4

Les principaux composants nécessaires à ce type d'enregistrement sont donc :

- un objectif L fournissant une onde sphérique Σ_s pour l'éclairage du plan objet,

- un plan de données binaires constituant l'objet appelé imageur au composeur de pages.

II.3 - Composition des pages. Dispositifs d'enregistrement et de lecture du plan mémoire

Pour la composition des pages il s'agit de transférer les signaux électriques binaires constituant les bits de la page sous la forme d'une transparence optique, en amplitude ou en phase, servant à enregistrer l'hologramme.

La méthode d'enregistrement des pages étant maintenant connue, il reste à définir le dispositif permettant la réalisation d'une matrice d'hologrammes telle que, quel que soit l'hologramme adressé, l'image restituée réelle se fait toujours au même endroit sur la matrice de photodétecteurs.

Au cours du prochain paragraphe on examinera donc les différents solutions possibles en fonction du type de mémoire à réaliser : mémoire morte (R.O.M.) ou mémoire vive (Inscriptible et effaçable).

III - ORGANISATION GENERALE D'UNE MEMOIRE MORTE R.O.M. (Read Only Memory).

Le plan mémoire est constitué par un matériau photosensible non reversible (plaque photographique haute résolution par exemple). Dans ce cas il est donc nécessaire de réenregistrer tout le plan mémoire si on désire modifier une seule page d'informations. Le schéma général concernant l'organisation est indiqué sur les figures 5 et 6. Le système de lecture du plan mémoire est dans ce cas indépendant du système d'enregistrement (5, 6, 7, 8).

III.1 - Dispositifs d'enregistrement du plan mémoire

III.1.1 - Enregistrement du plan mémoire par translation de l'objectif d'éclairage

Cette méthode d'enregistrement a été proposée et expérimentée par Anderson (2) pour la réalisation d'un plan mémoire de 32 x 32 pages holographiques de 10^4 bits.

La plaque photographique est placée dans le plan focal de l'objectif L. (figure 7). Le plan des données est fixe. Par translation de L on constate donc que l'onde objet issue de L permet de réaliser un hologramme quelconque de la matrice.

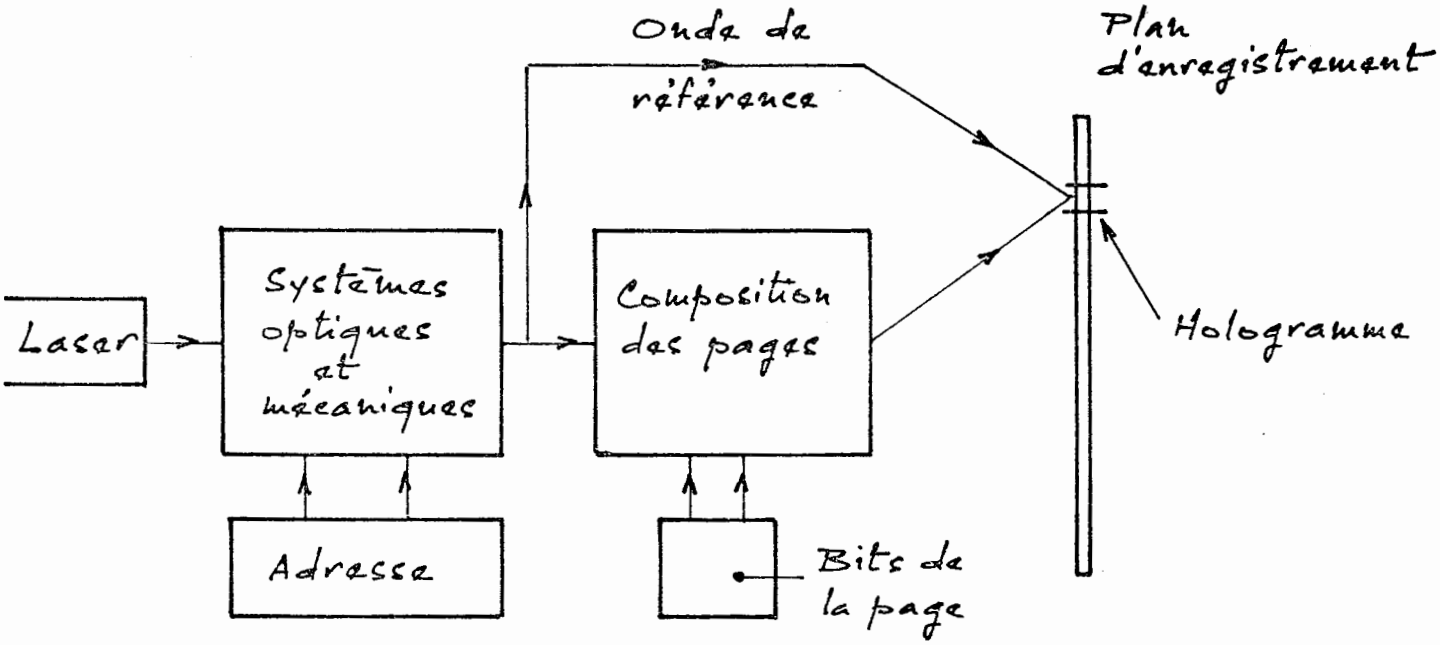


Figure 5

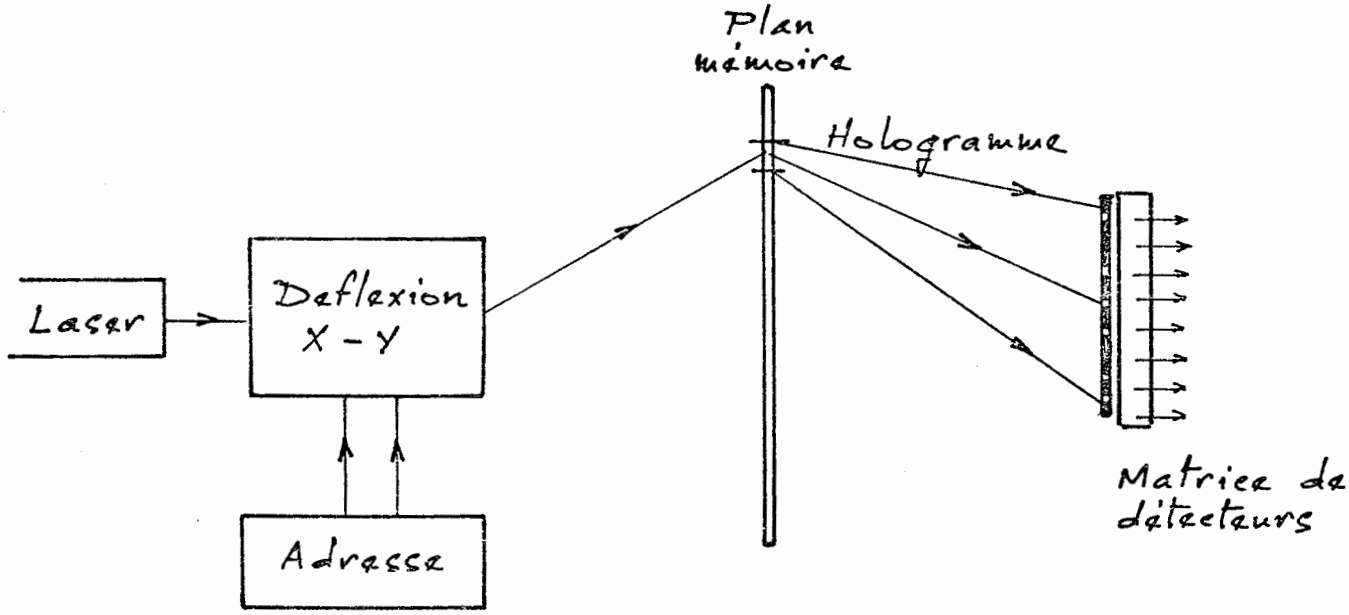


Figure 6

L'onde porteuse Σ_p se translate parallèlement à elle-même, ce déplacement étant solidaire de l'objectif L (figure 7).

Cette méthode est utilisable pour l'enregistrement de plans mémoires de faibles dimensions, car des limitations s'introduisent au niveau de la lentille d'éclairage (ouverture et diamètre).

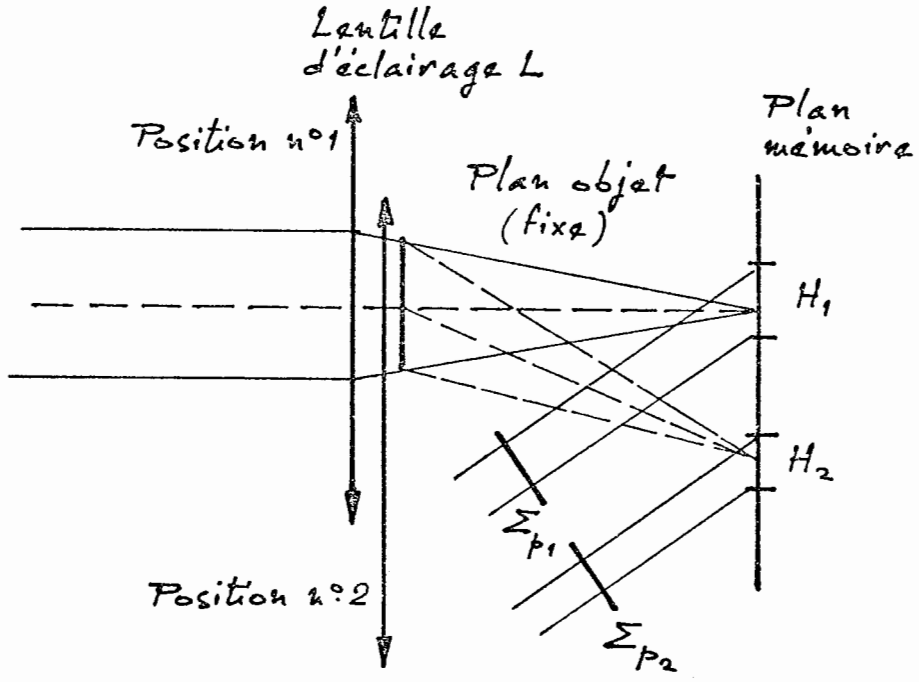


Figure 7

III.1.2 - Composition des pages

Dans le cas d'une mémoire morte la composition des pages peut être réalisée par transfert des données sur un film photographique par l'intermédiaire d'un Flying spot (figure 8).

Après développement le film est donc utilisé dans le système d'enregistrement du plan mémoire.

Au Laboratoire nous avons composé un plan de données à partir d'un tube d'oscilloscope.

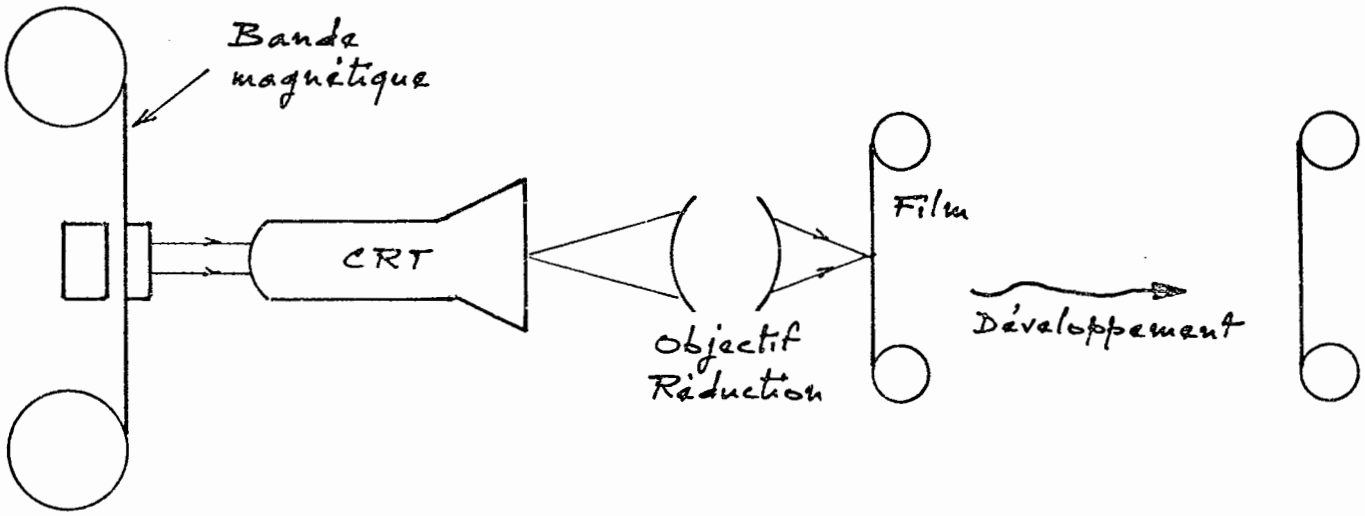


Figure 8

III.2 - Lecture du plan mémoire

On restitue une image réelle identique à l'objet en éclairant le plan mémoire à l'aide d'une onde de restitution identique à l'onde porteuse utilisée pour l'enregistrement (figure 9).

On transforme les variations angulaires du faisceau à la sortie du déflecteur en une translation parallèle à l'axe optique du système à l'aide de l'objectif O. Le déflecteur X-Y est placé au foyer de cet objectif.

Une mémoire conçue suivant les schémas correspondant aux figures 8 et 9 n'est pas compatible avec l'utilisation d'un matériau qui serait inscriptible et effaçable du type thermoplaste, ferroélectrique ou Manganèse Bismuth. En effet pour utiliser au mieux les possibilités d'un tel matériau il est indispensable de s'affranchir de tout déplacement mécanique de l'un des composants (objectifs d'éclairage par exemple) pour l'enregistrement de la matrice d'hologrammes. Dans ce cas les fonctions d'enregistrement et de lecture du plan mémoire doivent obligatoirement être réalisées par un système unique à l'aide du déflecteur de lumière.

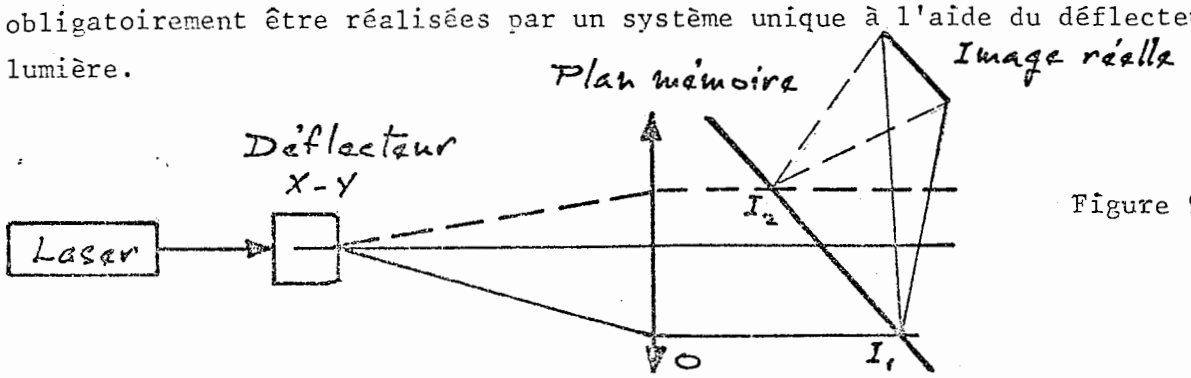


Figure 9

IV - ORGANISATION GENERALE D'UNE MEMOIRE INSCRIPTIBLE ET EFFACABLE

Le concept de mémoire holographique inscriptible et effaçable a été présenté pour la première fois par Collier (Bell-Labs) (9). Le schéma relatif à l'organisation générale d'une telle mémoire est indiqué sur la figure 10.

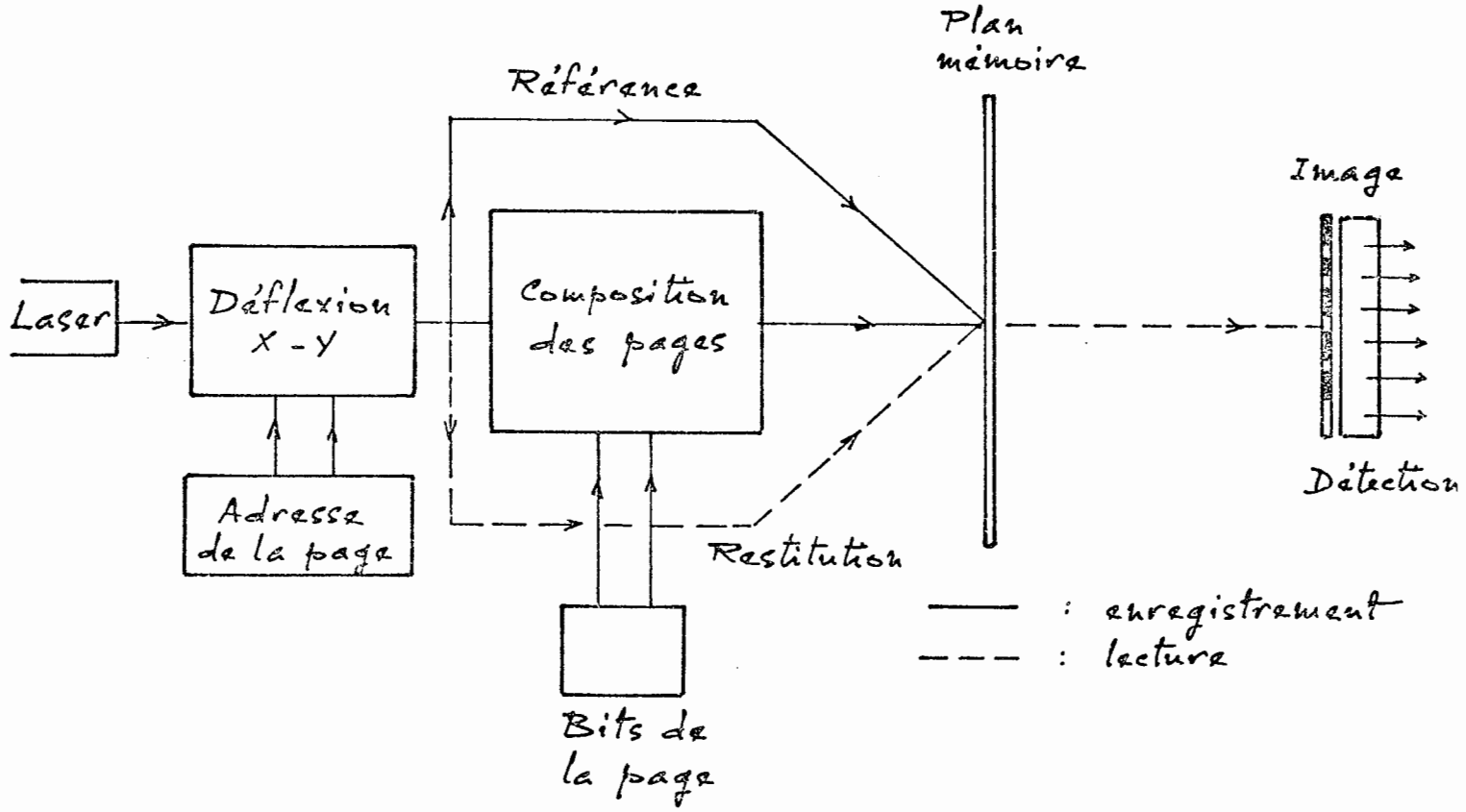


Figure 10

Les conditions auxquelles doit satisfaire l'organisation sont indiquées ci-dessous :

- les fonctions d'enregistrement et de lecture du plan mémoire sont réalisées à l'aide du déflecteur de faisceau laser sans aucun déplacement mécanique des

composants de la mémoire,

- l'onde porteuse et l'onde objet sont issues du même déflecteur,
- l'onde porteuse et le spectre du plan de données doivent coïncider en tout point du plan mémoire.

Le schéma optique permettant de satisfaire à ces conditions est indiqué sur la figure 40. Le mode de fonctionnement sera décrit de façon précise dans le paragraphe VII.

IV.1 - Dispositif d'enregistrement du plan mémoire par utilisation d'un réseau de lentilles

Le dispositif d'enregistrement proposé par Collier (9) puis par Rajchman et Stewart (10, 11) utilise un réseau de lentilles pour l'éclairage du plan de données.

Le système est tel que, quelle que soit l'onde d'adressage issue du déflecteur, le plan des données est toujours éclairé par une onde sphérique. Le mode de fonctionnement est indiqué sur la figure 11.

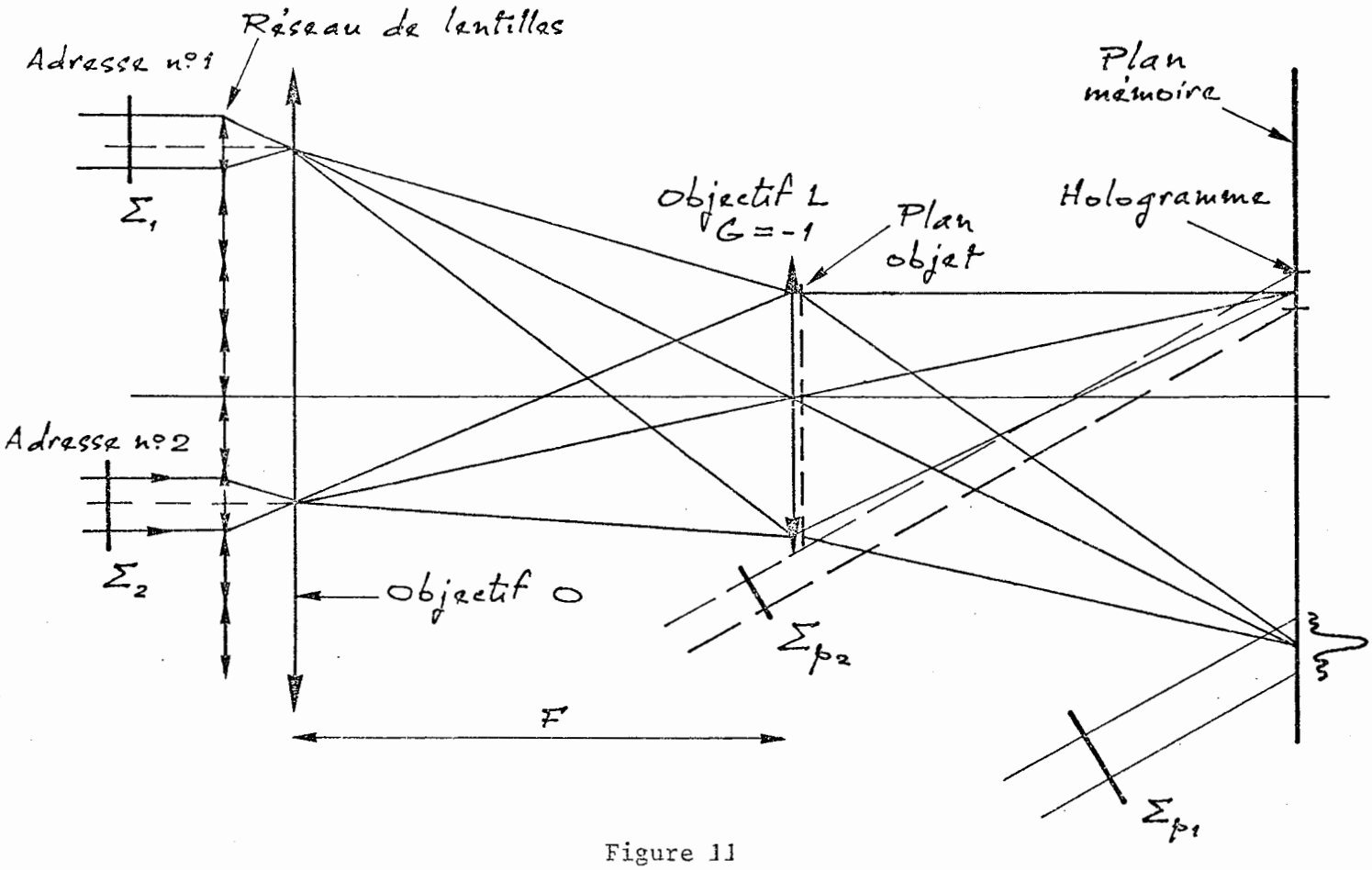


Figure 11

Le système optique complet permettant le déplacement synchrone des ondes Σ_i et Σ_{pi} à partir du déflecteur acousto-optique sera décrit de façon détaillée dans le chapitre VII.

V - ETUDE PARTICULIERE DE L'ENREGISTREMENT HOLOGRAPHIQUE D'UN PLAN DE DONNEES BINAIRES

V.1 - Calcul de la figure de diffraction du plan de données

Chaque bit d'information est représenté par une ouverture transparente de surface a^2 la distance entre deux bits consécutifs étant p. Le plan contient $N = (2k+1)^2$ bits. La dimension du plan est $L = 2kp$ (figure 12).

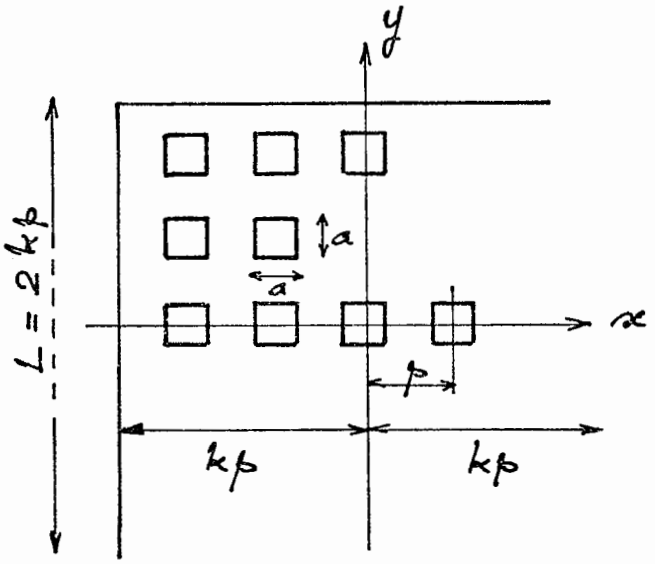


Figure 12

Expression mathématique de la transparence en amplitude du plan de données.

$$t(x,y) = \sum_n \sum_m \alpha(n,m)\, \delta(x-np) \cdot \delta(y-mp) \otimes f(x,y)$$

avec :

$$f(x,y) = \mathrm{Rect}\left[\frac{x}{a} ; \frac{y}{a}\right]$$

$$f(x,y) \left| \begin{array}{ll} = 1 & \begin{array}{l} |x| \leq a/2 \\ |y| \leq a/2 \end{array} \\ = 0 & \begin{array}{l} |x| > a/2 \\ |y| > a/2 \end{array} \end{array} \right.$$

α (n, m) caractérise l'amplitude lumineuse émise par chaque bit d'information ; α (n, m) vaut 1 ou 0 suivant la présence ou l'absence d'un tel bit. L'enregistrement de l'hologramme est réalisé par éclairage uniforme du plan de données à l'aide d'une onde sphérique Σ_s (figure 13).

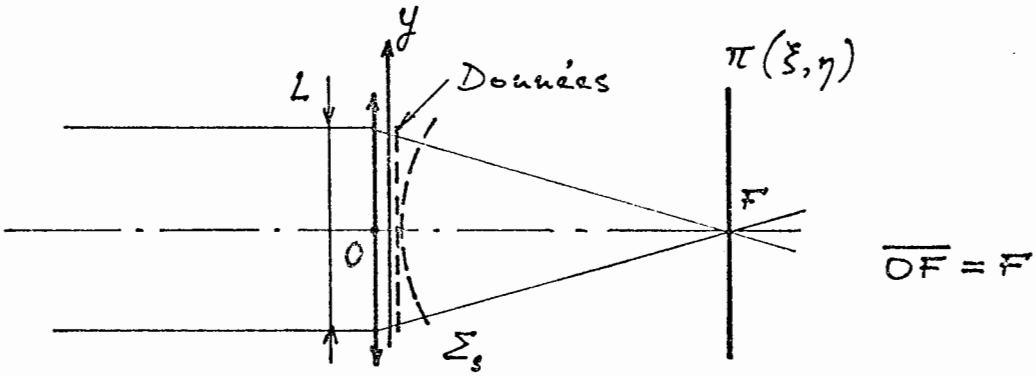


Figure 13

La transparence de l'objet s'écrit :

$$T(x,y) = t(x,y)\, e^{-\frac{ik}{2F}(x^2+y^2)}$$

en tenant compte de l'onde d'éclairage sphérique.

Calcul de l'amplitude diffractée dans le plan focal π de la lentille L

La répartition d'amplitude dans le plan π est donc la figure de diffraction d'un réseau de sources rayonnantes ayant entre elles une relation de phase déterminée et des amplitudes aléatoires 0 ou 1. Par application de la formule de diffraction de Fresnel et Kirchoff (12, 13) l'amplitude diffractée en un point (ξ, η) du plan π vaut :

$$A(\xi,\eta) = -\frac{i}{\lambda F} A_0 \int_{objet} T(x,y)\, e^{\frac{ik}{2F}[x^2+y^2+\xi^2+\eta^2-2xy-2\xi\eta]}\, dx\, dy$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

A_0 = amplitude incidente sur le plan de données. On obtient donc :

$$A(\xi,\eta) = -\frac{i}{\lambda F} A_0\, e^{\frac{ik}{2F}(\xi^2+\eta^2)} \int_{objet} T(x,y)\, e^{-\frac{2ik}{2F}(\xi x+\eta y)}\, dx\, dy$$

L'amplitude diffractée est donc proportionnelle à la transformée de Fourier de la transparence en amplitude du plan de données.

Calcul de la transformée de Fourier du plan des données

$$\mathcal{T}(\xi,\eta) = \int T(x,y)\, e^{-\frac{2ik}{2F}(x\xi+y\eta)}\, dx\, dy$$

$$T(x,y) = \sum_{-k}^{k}\sum_{-k}^{k} \alpha(n,m)\, \delta(x-np)\, \delta(y-mp) \otimes f(x,y)$$

$$\mathcal{T}(\xi,\eta) = \sum_{-k}^{k}\sum_{-k}^{k} \alpha(n,m)\, e^{-\frac{iknp\xi}{F}}\, e^{-\frac{ikmp\eta}{F}} \cdot \frac{2F}{k\xi} \cdot \frac{2F}{k\eta} \cdot \sin\frac{ka\xi}{2F} \cdot \sin\frac{ka\eta}{2F}$$

$$\mathcal{T}(\xi,\eta) = \frac{a^2 \sin\frac{\pi a\xi}{\lambda F}}{\frac{\pi a\xi}{\lambda F}} \cdot \frac{\sin\frac{\pi a\eta}{\lambda F}}{\frac{\pi a\eta}{\lambda F}} \cdot \sum_{-k}^{k}\sum_{-k}^{k} \alpha(n,m)\, e^{-\frac{2i\pi}{\lambda F}(np\xi+mp\eta)}$$

L'intensité dans le spectre étant proportionnelle au carré de l'amplitude A (ξ,η) on a :

$$I(\xi,\eta) = |A(\xi)|^2 = \frac{A_0^2}{\lambda^2 F^2} \left|\mathcal{T}(\xi,\eta)\right|^2$$

$$\boxed{I(\xi,\eta) = \frac{A_0^2}{\lambda^2 F^2} \times a^4 \left| \frac{\sin \frac{\pi a \xi}{\lambda F}}{\frac{\pi a \xi}{\lambda F}} \cdot \frac{\sin \frac{\pi a \eta}{\lambda F}}{\frac{\pi a \eta}{\lambda F}} \right|^2 \left| \sum_{-k}^{k} \sum_{-k}^{k} \alpha(n,m)\, e^{-\frac{2i\pi p}{\lambda F}(n\xi + m\eta)} \right|^2}$$

- Cas particulier d'une répartition régulière de bits 1

$$\alpha(n,m) = 1 \qquad \forall n \; -k \leqslant n \leqslant k$$
$$\forall m \; -k \leqslant m \leqslant k$$

$$I(\xi,\eta) = \frac{A_0^2}{\lambda^2 F^2} a^4 \left| \frac{\sin \frac{\pi a \xi}{\lambda F}}{\frac{\pi a \xi}{\lambda F}} \cdot \frac{\sin \frac{\pi a \eta}{\lambda F}}{\frac{\pi a \eta}{\lambda F}} \right|^2 \cdot \left| \sum_{-k}^{k} \sum_{-k}^{k} e^{-\frac{2i\pi p}{\lambda F}(n\xi + m\eta)} \right|^2$$

$$\boxed{I(\xi,\eta) = \frac{A_0^2 a^4}{\lambda^2 F^2} \left| \frac{\sin \frac{\pi a \xi}{\lambda F}}{\frac{\pi a \xi}{\lambda F}} \cdot \frac{\sin \frac{\pi a \eta}{\lambda F}}{\frac{\pi a \eta}{\lambda F}} \right|^2 \cdot \left| \frac{\sin (2k+1) \frac{\pi p \xi}{\lambda F}}{\sin \frac{\pi p \xi}{\lambda F}} \cdot \frac{\sin (2k+1) \frac{\pi p \eta}{\lambda F}}{\sin \frac{\pi p \eta}{\lambda F}} \right|^2}$$

$$\boxed{I = I_1 \times I_2}$$

La relation précédente montre que l'intensité diffractée dans le plan (ξ, η) est le produit de deux termes :

$$I = I_1 \times I_2$$

- I_1 est la répartition d'intensité due à la pupille de surface a^2
- I_2 est une fonction caractéristique du pas p de la matrice de points.

- Courbe représentative de la variation de I (figure 14)

Les maximums d'intensité sont équidistants de $\frac{\lambda F}{p}$

La plus grande partie de l'énergie diffractée se trouve donc concentrée autour du point F, région où sont localisées les faibles fréquences spatiales de l'objet. Pour un matériau photosensible ayant une dynamique limitée il est donc impossible d'enregistrer simultanément l'information relative aux basses et aux hautes fréquences spatiales présentes dans l'objet. Afin de réaliser un hologramme

de bonne qualité (rendement et rapport signal/bruit dans l'image élevés) il est donc indispensable d'uniformiser l'énergie dans le plan d'enregistrement. Afin de satisfaire à cette condition deux solutions ont été proposées :

- enregistrement de l'hologramme dans le plan π' légèrement défocalisé (14),
- utilisation d'une grille de phase calculée placée contre le plan des données (15, 16, 17).

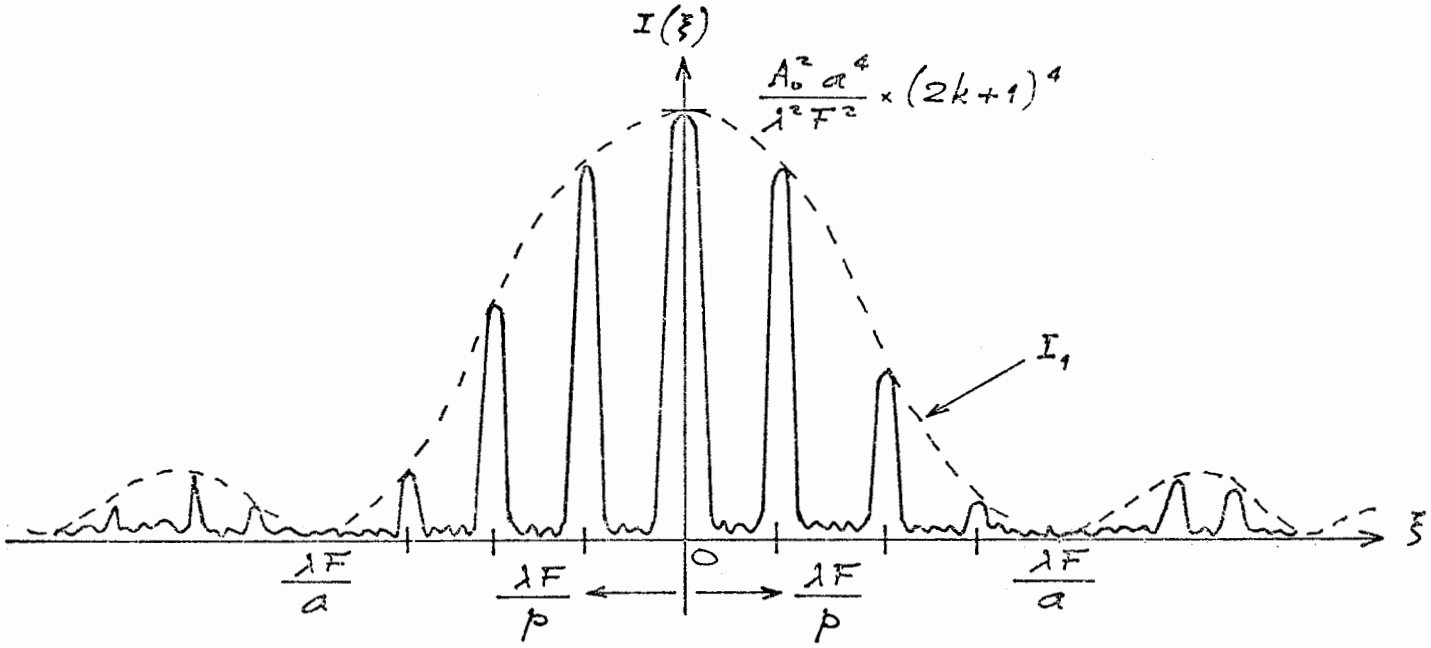
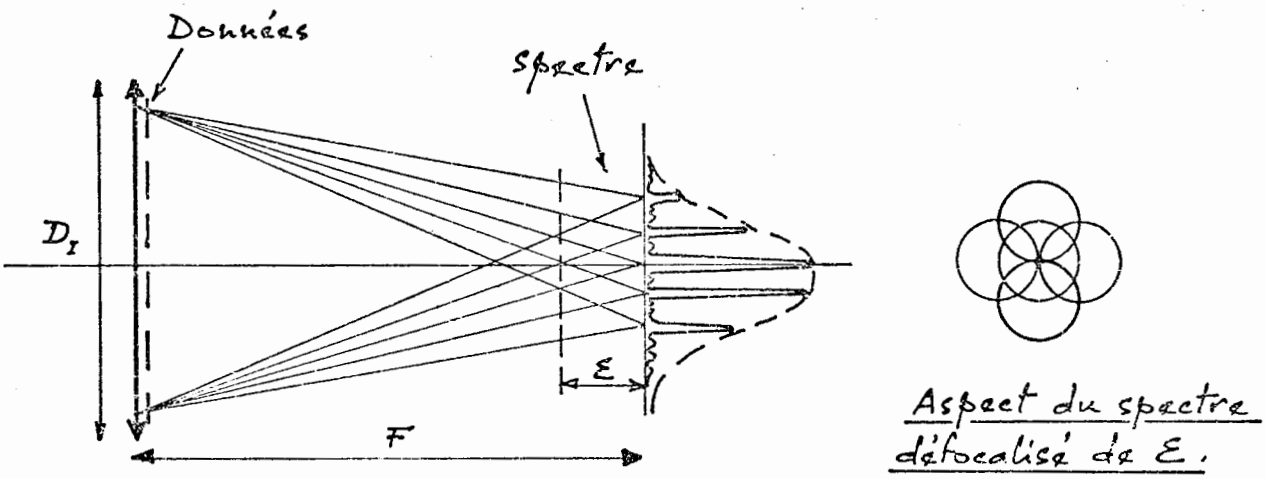


Figure 14

V.2 - Enregistrement des hologrammes par défocalisation du spectre (figure 15)

Une détermination de la défocalisation optimum a été présentée par Goldman (14) en employant un raisonnement géomètrique. Le meilleur compromis entre le rendement et les effets de non linéarité serait réalisé lorsque des taches de diffraction se chevauchent comme il a été indiqué sur la figure 15.



D_I = Dimension du plan des données

Figure 15

La défocalisation correspondante $\mathcal{E}$ vaut donc :

$$\frac{\frac{2\lambda F}{p}}{D_I} = \frac{\mathcal{E}}{F-\mathcal{E}} \qquad \mathcal{E} \ll F$$

soit

$$\mathcal{E} \simeq 2\lambda\left(\frac{D_I}{F}\right)^2\sqrt{N}$$

V.3 - Enregistrement des hologrammes par utilisation d'une grille de phase

On a vu précédemment que la figure de diffraction du plan de données est celle d'un réseau de sources rayonnantes, ayant entre elles une relation de phase fixe, mais des amplitudes aléatoires 0 ou 1. Cette relation de phase, fixée par le pas p du réseau est responsable des pics de diffraction dans le plan d'enregistrement.

La méthode proposée par Burckhardt (16) pour supprimer ces pics de diffraction consiste donc à coder chaque bit d'information par une fonction de

phase aléatoire φ (n, m).

Le problème se ramène alors au calcul de la figure de diffraction d'un réseau de sources ayant des amplitudes, 0 ou 1 et des phases aléatoires φ (n, m).

L'intensité diffractée s'écrit donc dans ce cas :

$$I(\xi,\eta) = \frac{A_0^2}{\lambda^2 F^2} \left| \frac{\sin \frac{\pi a \xi}{\lambda F}}{\frac{\pi a \xi}{\lambda F}} \cdot \frac{\sin \frac{\pi a \eta}{\lambda F}}{\frac{\pi a \eta}{\lambda F}} \right|^2 \left| \sum_{-k}^{k} \sum_{-k}^{k} \alpha(n,m)\, e^{i\varphi(n,m)}\, e^{-\frac{2i\pi}{\lambda F}(n\xi + m\eta)} \right|^2$$

Dans le cas particulier d'un réseau de bits 1 $\left[\alpha(n,m) = 1 \; ; \; \forall m,n\right]$

on a :

$$I(\xi,\eta) = \frac{A_0^2}{\lambda^2 F^2} \left| \frac{\sin \frac{\pi a \xi}{\lambda F}}{\frac{\pi a \xi}{\lambda F}} \cdot \frac{\sin \frac{\pi a \eta}{\lambda F}}{\frac{\pi a \eta}{\lambda F}} \right|^2 \left| \sum_{-k}^{k} \sum_{-k}^{k} e^{i\varphi(n,m)}\, e^{-\frac{2i\pi}{\lambda F}(n\xi + m\eta)} \right|^2$$

La valeur moyenne de l'intensité vaut :

$$\boxed{I(\xi,\eta) = \frac{A_0^2}{\lambda^2 F^2} \left| \frac{\sin \frac{\pi a \xi}{\lambda F}}{\frac{\pi a \xi}{\lambda F}} \cdot \frac{\sin \frac{\pi a \eta}{\lambda F}}{\frac{\pi a \eta}{\lambda F}} \right|^2 \times (2k+1)^2}$$

La valeur moyenne de l'intensité en un point est donc dans ce cas le produit du nombre de bits par la figure de diffraction du bit élémentaire de surface a^2. On retrouve là le résultat du théorème relatif à la figure de diffraction d'un ensemble de pupilles aléatoires.

On a indiqué sur les figures 16, 17 à la même échelle, la courbe de variation de l'intensité I pour les deux cas calculés précédemment.

Figure 16 : Spectre d'un réseau de $(2k + 1)^2$ points

Figure 17 : Spectre d'un réseau de $(2k + 1)^2$ points avec déphasage aléatoire de chacun des points.

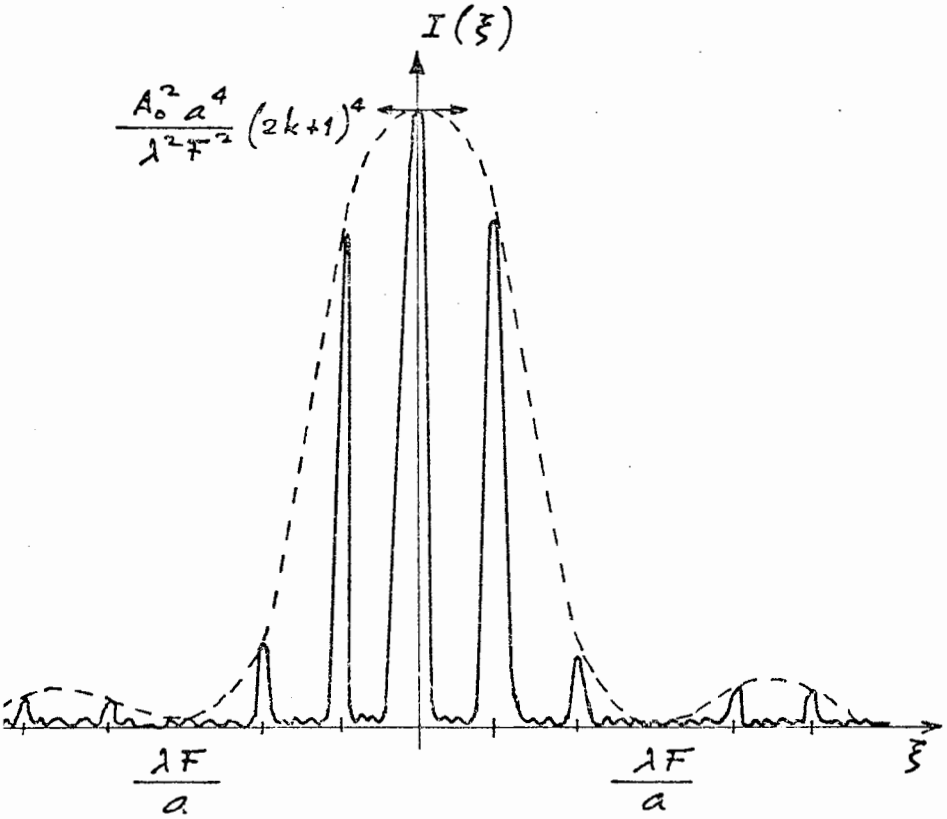


Figure 16

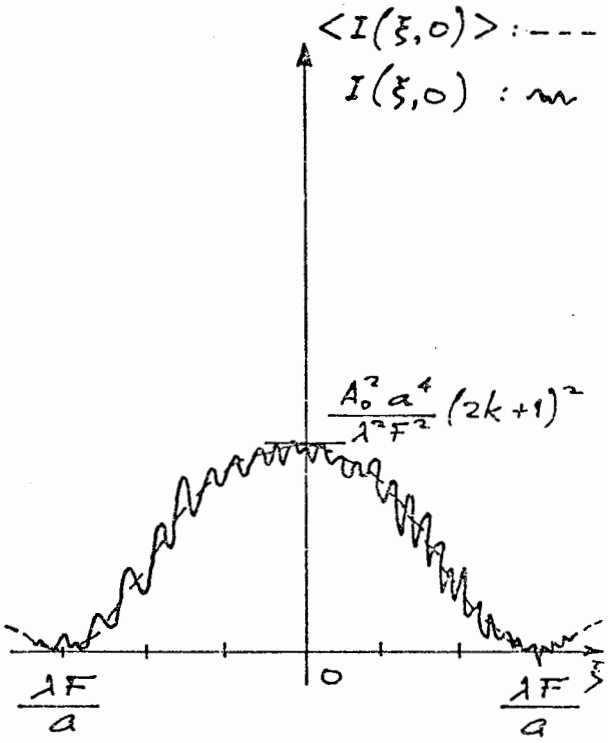


Figure 17

La figure 17 montre donc que dans ce cas, la répartition d'intensité dans le plan du spectre devient suffisamment uniforme pour permettre l'enregistrement de l'hologramme sans aucune défocalisation.

V.4 - Diverses méthodes permettant de réaliser un déphasage aléatoire entre chaque bit d'information du plan objet

Grille de phase binaire superposée au plan objet (16)

On peut montrer que si on utilise seulement deux niveaux de phase 0 ou π répartis de façon aléatoire les résultats obtenus quant à la figure de diffraction sont très voisins des courbes théoriques. Devant chaque bit d'information se trouve donc un seul élément déphasant 0 ou π . Le déphasage est obtenu par modulation de l'épaisseur d'un matériau transparent en utilisant les techniques de photogravures ou de dépôt sous vide de couches minces (figure 18).

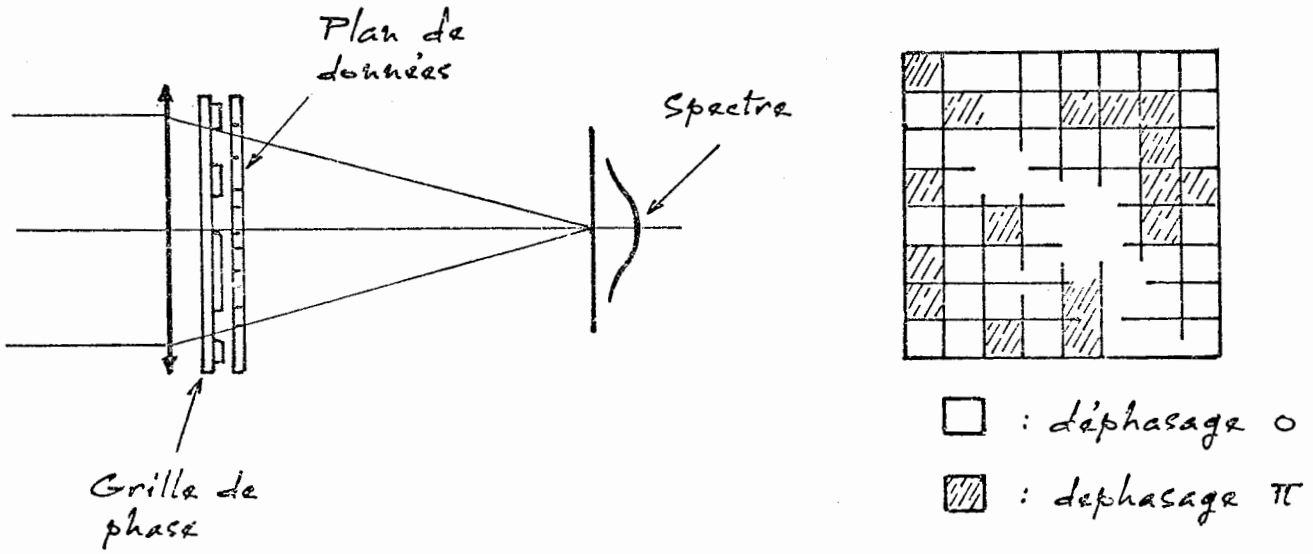


Figure 18

Suivant le même principe des grilles de phases plus élaborées et possédant quatre niveaux discrets répartis de façon aléatoire ont été réalisées par Takeda (17, 18).

Déplacement du bit d'information

Le même effet de déphasage aléatoire d'un bit par rapport à son voisin peut être obtenu en déplaçant légèrement le bit par rapport à sa position théorique. On retrouve là une méthode couramment utilisée pour la réalisation des hologrammes synthétiques générés sur ordinateur (figure 19).

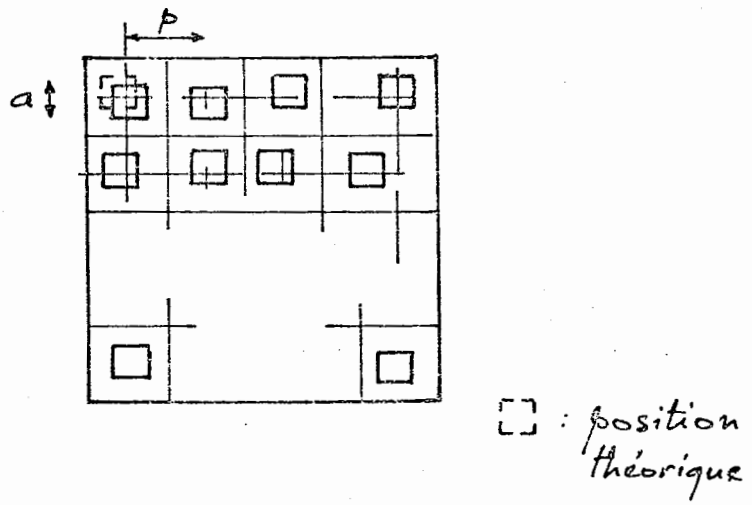


Figure 19

V.5 - Relation entre le nombre de points dans l'image et le diamètre de l'hologramme. Résultats expérimentaux

Soit d le diamètre de l'hologramme et Δ la distance entre le plan de l'hologramme et le plan image (figure 20).

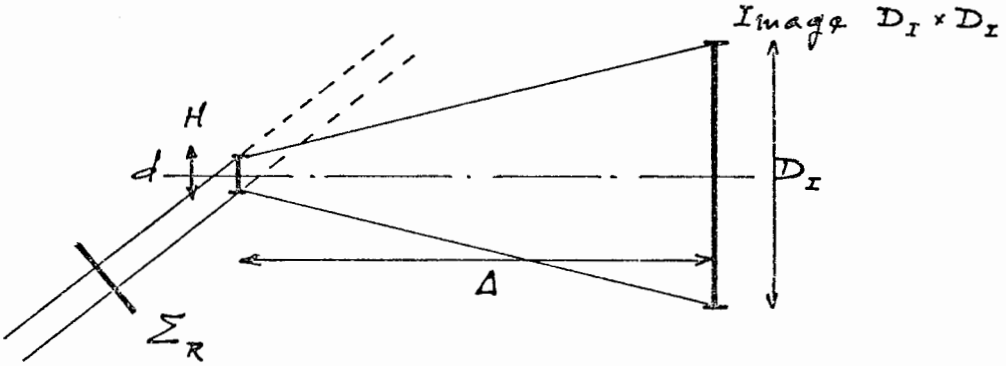


Figure 20

- Σ_R ; onde de restitution de l'hologramme H
- Dimension de l'image restituée $D_I \times D_I$

Vue la dimension limitée de l'hologramme, la distance minimum entre deux points qui seront séparés dans l'image vaut :

$$\delta_0 = \frac{\lambda \Delta}{d}$$

Si on adopte un critère de séparation deux fois plus sévère que celui de Rayleigh calculé ci-dessus, afin d'obtenir une modulation plus grande dans l'image, la distance minimum d'entre deux bits consécutifs s'écrit :

$$\delta \simeq \frac{2\lambda\Delta}{d}$$

Pour une image de surface D_I^2 le nombre de bits N qu'il est possible de stocker vaut donc :

$$N = \frac{D_I^2}{\delta^2} = \frac{D_I^2}{4\lambda^2\Delta^2} d^2$$

$$\boxed{N = \frac{D_I^2 d^2}{4\lambda^2\Delta^2}}$$

La quantité $\frac{D_I^2 d^2}{\Delta^2}$ représente l'étendue géomètrique U du faisceau formant l'image.

On a donc :

$$N = \frac{U}{4\lambda^2}$$

Si k est le nombre d'ouverture de l'objectif d'éclairage ($\Delta = k\sqrt{2}D_I$) le nombre de points dans l'image s'écrit :

$$N = \frac{1}{8} \times \frac{d^2}{k^2\lambda^2}$$

Application numérique :

- Diamètre de l'hologramme d = 1 mm
- $\lambda = 0{,}5\ \mu$
- Dimension de l'image D_I = 30 x 30 mm
- n = 3

$$N = \frac{1}{8} \times \frac{4}{9\ 10^{-6}}$$

$$N = 5 \times 10^4$$

Des hologrammes de bonne qualité de diamètre 1 et 2 mm ont été obtenus à l'aide d'objectifs d'ouverture k = 3 et k = 10 ; les images restituées sont indiquées sur la figure I . On peut noter également sur la figure II l'évolution de la qualité de l'image pour des diamètres plus faibles du faisceau de restitution. Le rendement de diffraction est de l'ordre de 1%.

L C R

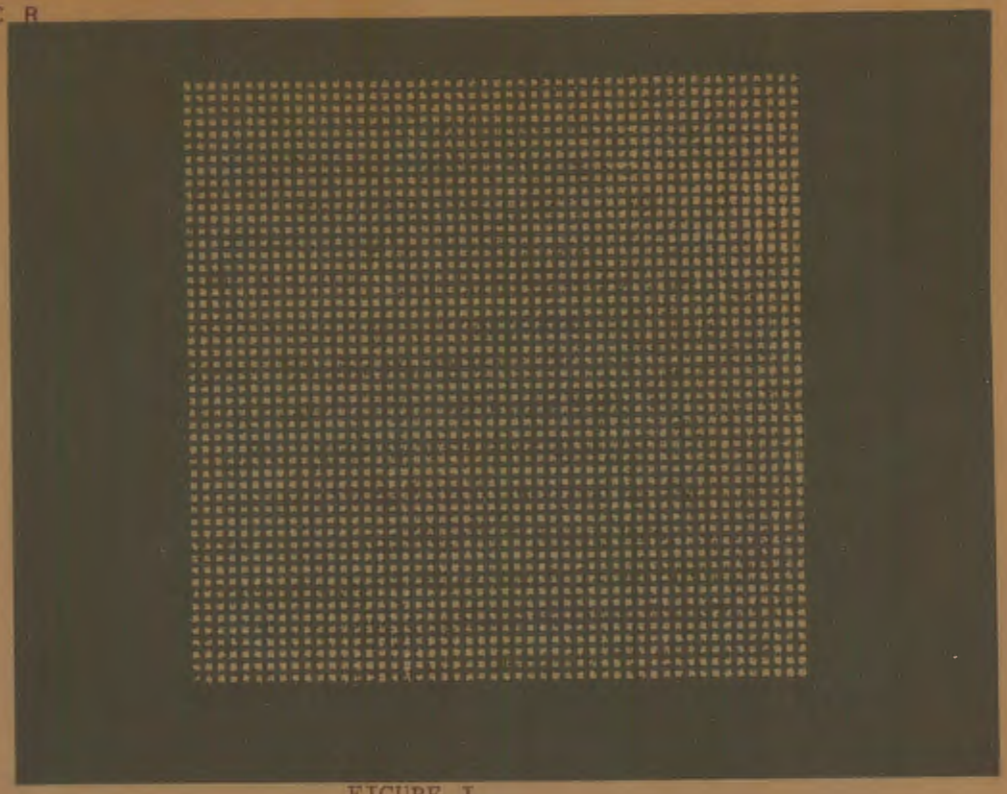


FIGURE I

Image restituée $\emptyset = 1$ $\emptyset = 2$ mm

10^4 bits

Image restituée.

L C R

Diamètre de l'hologramme :

- Ø = 2 mm

- Ø = 1,5 mm

FIGURE II

Evolution de la quali

- Ø = 1 mm

VI - CAPACITE D'UNE MEMOIRE HOLOGRAPHIQUE ORGANISEE PAR PAGES

On étudie dans ce chapitre la capacité globale de la mémoire en fonction de certains paramètres géomètriques caractéristiques : dimensions de l'image, angle de diffraction maximum de l'hologramme.

Notons que les calculs effectués sont absolument indépendants du type de mémoire à réaliser : mémoire morte ou mémoire inscriptible et effaçable. Le calcul de la capacité s'obtient en effet par des considérations d'optique physique qui sont liées à la fonction essentielle du plan mémoire, c'est à dire, la possibilité de former une image fixe sur la matrice de détection quelque soit la page holographique considérée.

On évaluera dans une première partie la capacité de la mémoire en supposant que les angles de diffractions nécessaires à la formation de l'image sont faibles. Ceci ne constitue en fait qu'une première approximation. On calculera dans la deuxième partie les limitations introduites par le fait que l'angle de diffraction peut prendre des valeurs appréciables lorsque la capacité de la mémoire devient grande ($C > 10^8$ bits).

VI.1 - Notations utilisées

Le plan mémoire est constitué par une matrice de M pages holographiques, chaque page étant le micro-hologramme d'un plan de N données binaires (figure 21).

Soient : D_I : dimension de l'image restituée

D_H : dimension du plan mémoire

Δ : distance Image-plan mémoire

Chaque page holographique est supposée carrée de surface a^2. Le pas étant égal à p on pose :

$$p = \frac{a}{\varepsilon} \qquad (\varepsilon < 1)$$

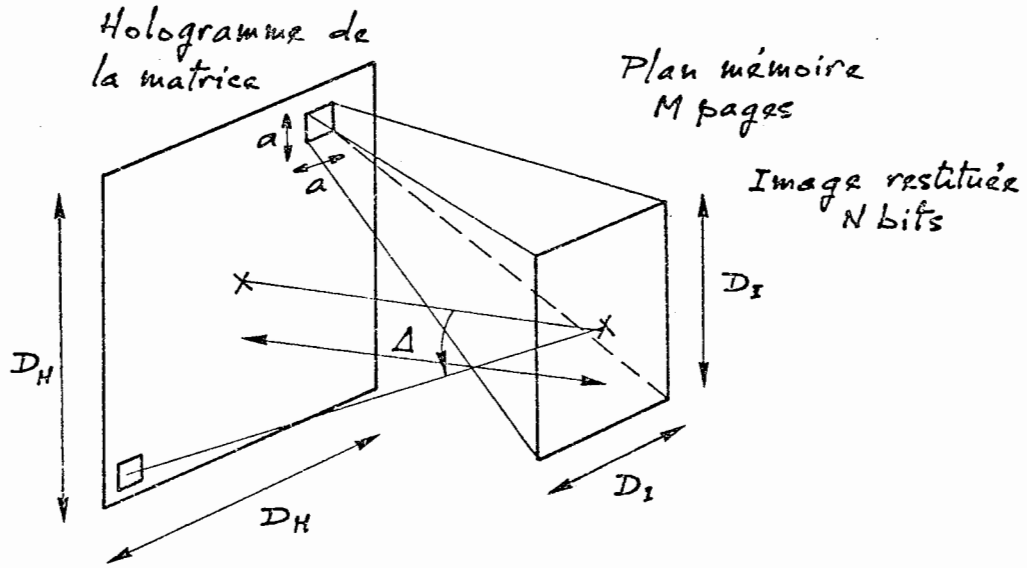


Figure 21

La quantité $\mathcal{E}^2$ est le taux de remplissage du plan mémoire. Cette quantité est liée au fait que les hologrammes du plan mémoire ne peuvent être jointifs (figure 22).

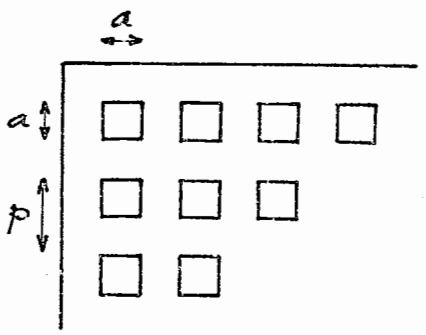


Figure 22

VI.2 - Capacité de la mémoire - Applications numériques

La capacité globale est le produit C = M x N. En considérant que deux points dans l'image seront résolus par la matrice de photodétecteurs si leur distance vaut deux fois le critère de Rayleigh, et que le taux de remplissage du plan mémoire est égal à $\mathcal{E}^2$, la capacité globale s'obtient à partir de l'étendue géomètrique U entre le plan mémoire et l'image restituée :

$$\boxed{C = \frac{\mathcal{E}^2}{4} \frac{U}{\lambda^2}}$$

$$U = \frac{D_H^2 \times D_I^2}{\Delta^2}$$

En posant $D_H = \alpha \Delta$: (α : ouverture du plan mémoire) on obtient :

$$\boxed{C = \frac{\mathcal{E}^2}{4} \alpha^2 \frac{D_I^2}{\lambda^2}}$$

Pour une longueur d'onde et une ouverture α données la capacité ne dépend donc que de la dimension de l'image restituée D_I. Ceci indépendamment de l'organisation interne de la mémoire (Nombre de pages et nombre de bits par page).

Dans les tableauc ci-dessous nous calculerons la dimension de l'image pour deux valeurs possibles du taux de remplissage ($\mathcal{E}^2 = 1/2$ et $\mathcal{E}^2 = 1/4$).

L'ouverture α est prise égale à l'unité. Ce choix sera justifié par la suite lorsque on étudiera l'influence de l'angle de diffraction sur la forme du bit dans le plan image.

Les longueurs d'ondes considérées sont :

λ = 0,51 μ (Laser Argon)

λ = 0,53 μ (Laser YAG doublé en fréquence)

λ = 0,6328 μ (Laser He-Ne)

$\lambda = 0,5\ \mu$

Capacité C	ε^2	D_I	Pas des bits dans l'image
10^8	$\frac{1}{4}$	20 mm	200 μ
$M = 10^4$	$\frac{1}{2}$	14 mm	140 μ
$N = 10^4$			
10^{10}	$\frac{1}{4}$	200 mm	640 μ
$M = 10^5$	$\frac{1}{2}$	140 mm	460 μ
$N = 10^5$			
10^{12}	$\frac{1}{4}$	2 m	2 mm
$M = 10^6$	$\frac{1}{2}$	1,4 m	1,4 mm
$N = 10^6$			

$\lambda = 0,53\ \mu$

10^8	$\frac{1}{4}$	22,5 mm	225 μ
	$\frac{1}{2}$	15,7 mm	157 μ
10^{10}	$\frac{1}{4}$	225 mm	700 μ
	$\frac{1}{2}$	157 mm	500 μ
10^{12}	$\frac{1}{4}$	2,25 m	2,25 mm
	$\frac{1}{2}$	1,57 m	1,57 mm

$$\lambda = 0{,}63\ \mu$$

10^8	$\frac{1}{4}$	31,8 mm	318 μ
	$\frac{1}{2}$	318 mm	222 μ
10^{10}	$\frac{1}{4}$	318 mm	1,02 mm
	$\frac{1}{2}$	222 mm	0,730 mm
10^{12}	$\frac{1}{4}$	3,18 m	3,18 mm
	$\frac{1}{2}$	2,22 m	2,22 mm

Les paramètres géomètriques de la mémoire sont entièrement déterminés si on fait intervenir le nombre d'ouverture k de la matrice de détection défini par la relation :

$$\Delta = k\, D_I$$

La densité de stockage correspondante vaut donc :

$$D = \frac{C}{D_H^2} = \frac{\mathcal{E}^2}{4k^2\lambda^2}$$

Toutes les autres caractéristiques géomètriques du plan mémoire sont indiquées dans les tableaux suivants.

Pour différentes valeurs de la capacité on a calculé la dimension du plan de stockage, le diamètre de l'hologramme, et la distance image-plan mémoire.

Applications numériques :

$k = 5$ $\alpha = 1$

$\lambda = 0,5\,\mu$

C	ε^2	D_I	Δ	a	D_H
10^8	$\frac{1}{4}$	20 mm	100mm	500 μ	100mm
$M=10^4$ $N=10^4$	$\frac{1}{2}$	14 mm	70mm	500 μ	70mm
10^{10}	$\frac{1}{4}$	200mm	1 m	1,58mm	1 m
$M=10^5$ $N=10^5$	$\frac{1}{2}$	140mm	0,7 m	1,58 mm	0,70 m
10^{12}	$\frac{1}{4}$	2 m	10 m	5 mm	10 m
$M=10^6$ $N=10^6$	$\frac{1}{2}$	1,4 m	7 m	5 mm	7 m
D	$\frac{1}{4}$	$D = 10^6$ bits/cm^2			
	$\frac{1}{2}$	$D = 2\ 10^6$ bits/cm^2			

$\lambda = 0,53\,\mu$

C	ε^2	D_I	Δ	a	D_H
10^8	$\frac{1}{4}$	22,5mm	113mm	530 μ	113 mm
	$\frac{1}{2}$	15,7 mm	78.5mm	530 μ	78,5mm
10^{10}	$\frac{1}{4}$	225 mm	1,13 m	1,68mm	1,13 m
	$\frac{1}{2}$	157 mm	0,785 m	1,68mm	0,785m
10^{12}	$\frac{1}{4}$	2,25 m	11,3 m	5,3 mm	11,3 m
	$\frac{1}{2}$	1,57 m	7,8 m	5,3 mm	7,8 m
D	$\frac{1}{4}$	$D = 0,9\ 10^6$ bits/cm^2			
	$\frac{1}{2}$	$D = 1,8\ 10^6$ bits/cm^2			

$\lambda = 0{,}63\ \mu$

C	ε^2	D_I	Δ	a	D_H
10^8	$\frac{1}{4}$	31,8 mm	159mm	630 μ	159mm
	$\frac{1}{2}$	22,2 mm	111mm	630 μ	111mm
10^{10}	$\frac{1}{4}$	318 mm	1,59 m	2 mm	1,59 m
	$\frac{1}{2}$	222 mm	1,1 m	2 mm	1,1 m
10^{12}	$\frac{1}{4}$	3,18 m	15,9 m	6,2 mm	15,9 m
	$\frac{1}{2}$	2,22 m	11,1 m	6,2 mm	11,1 m
D	$\frac{1}{4}$	$D = 6{,}4\ 10^5$ bits/cm^2			
	$\frac{1}{2}$	$D = 1{,}3\ 10^6$ bits/cm^2			

L'examen des résultats théoriques obtenus nous montre que la densité de stockage réalisée, de l'ordre de 10^6 bits/cm^2, est plus faible que celle généralement admise par le stockage de l'information sous forme optique (10^8 bits/cm^2) Cette densité obtenue est la conséquence des deux remarques suivantes :

- les hologrammes du plan mémoire ne peuvent être jointifs (problèmes liés à la précision d'adressage et la nécessité absolue de n'éclairer qu'une seule page du plan).

- la dimension du plan mémoire est limitée à une ouverture α égale à l'unité. En effet nous montrerons dans les paragraphes VI.5, VI.6 que si les angles de diffractions deviennent importants ($\theta > 45°$) la résolution dans l'image diminue. L'ouverture $\alpha = 1$, constitue un optimum qu'il est pratiquement inutile de dépasser.

En se limitant à des dimensions raisonnables en plan mémoire ($D_H \leqslant 1$m) nous voyons d'autre part que la capacité limite qu'il est possible d'obtenir à l'aide de l'organisation présentée sur la figure 21 est de 10^{10} bits.

Sur les figures 24 et 25 sont indiquées toutes les caractéristiques géométriques d'une mémoire de capacité 10^8 et 10^{10} bits. Le taux de remplissage considéré est égal à 1/2.

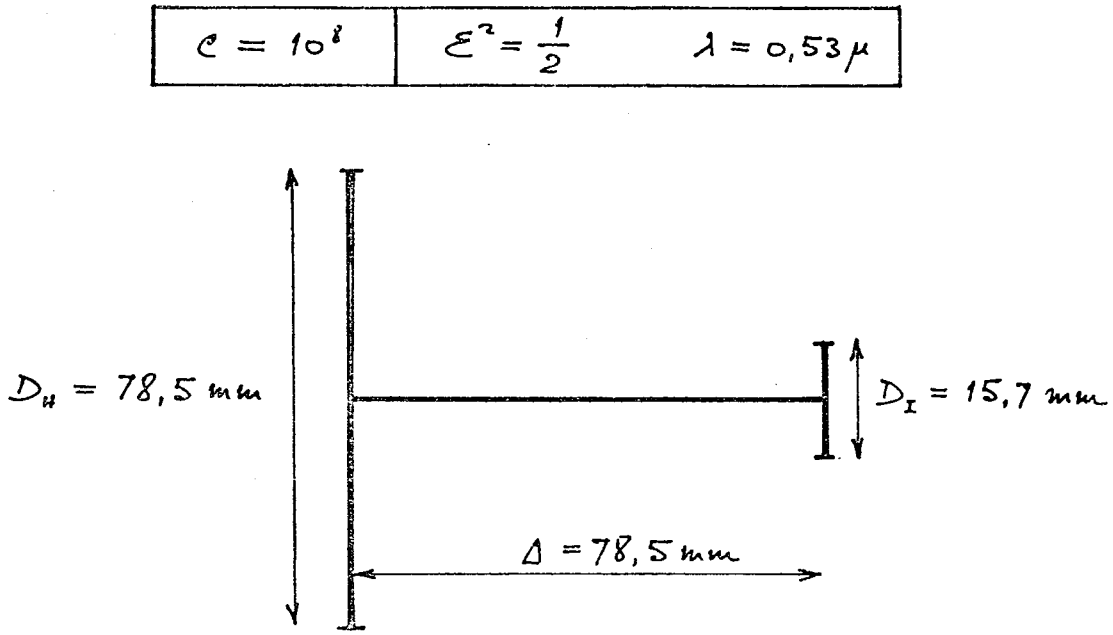


Figure 24

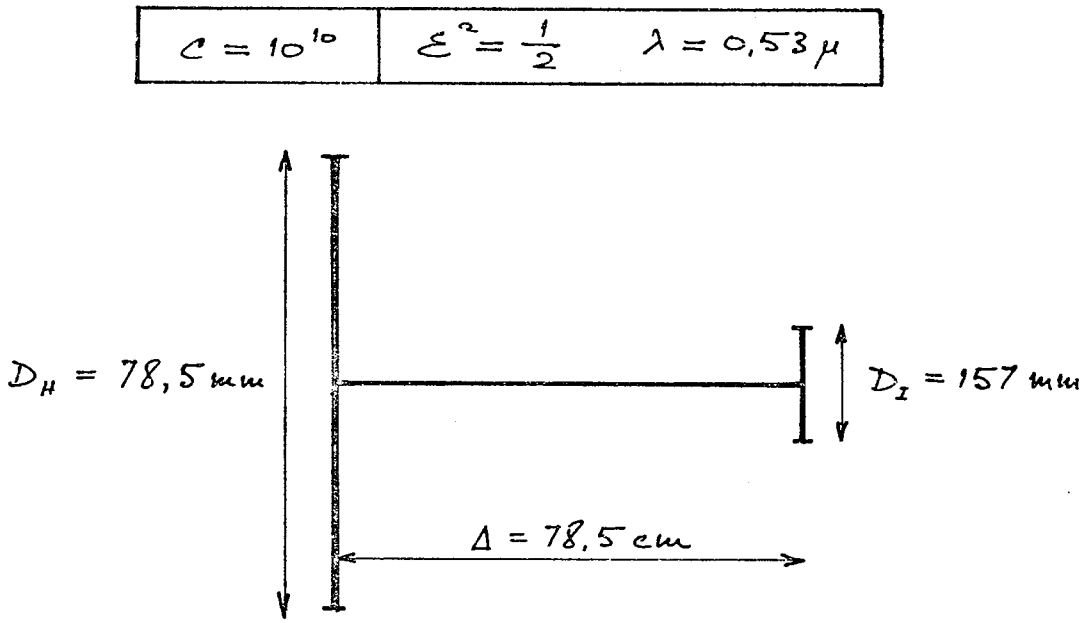


Figure 25

VI.3 - Angles de diffraction correspondants

Soit θ_M l'angle de diffraction correspondant à l'hologramme situé sur le bord extrême du plan mémoire qui diffracte la surface d'onde relative au bit d'information situé sur le bord de l'image (figure 26).

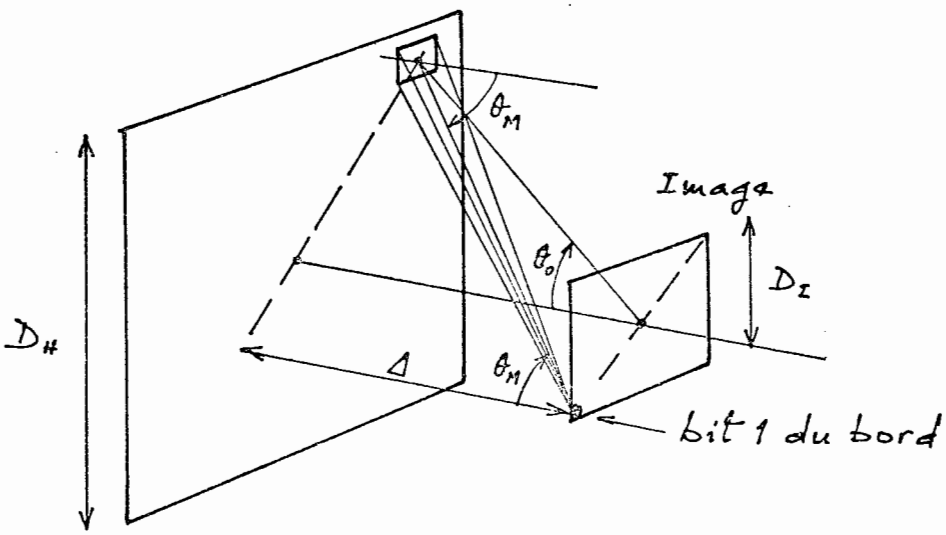


Figure 26

On a donc :

$$tg\,\theta_M = \frac{\sqrt{2}}{2}\left(\frac{D_I + D_H}{\Delta}\right)$$

$$\boxed{tg\,\theta_M = \frac{\sqrt{2}}{2}\left(\alpha + \frac{1}{k}\right)}$$

$$\boxed{tg\,\theta_0 = \frac{\alpha\sqrt{2}}{2}}$$

Applications numériques.

$\alpha = 1$	$tg\,\theta_0 = \frac{\sqrt{2}}{2}$	$\theta_0 = 35°20'$
$k = 5$	$tg\,\theta_M = 0{,}85$	$\theta_M = 41°$

VI.4 - Influence des angles de diffraction sur la forme des bits dans l'image

La relation donnant la capacité globale de la mémoire a été obtenue en négligeant l'influence de l'angle d'inclinaison θ. Le calcul effectué ci-dessous a pour but d'établir la loi de variation du nombre de bits dans l'image en fonction de l'angle θ correspondant à un hologramme de la matrice (20, 21).

La méthode de calcul adoptée utilise des résultats connus d'optique physique. L'utilisation directe des intégrales de diffraction telle qu'elle est présentée dans la référence (21) masquant l'origine physique des effets d'ellipticité des bits dans l'image.

Le plan mémoire est supposé constitué par un réseau de pages holographiques carrées équidistantes suivant les deux directions X-Y. La figure de diffraction due à la pupille de l'hologramme de côté a diffractant suivant l'angle θ a dans le plan (OX, OY) une allure elliptique. C'est la figure de diffraction due à la section droite du cône de sommet O et s'appuyant sur la pupille de côté a (figures 27 et 28).

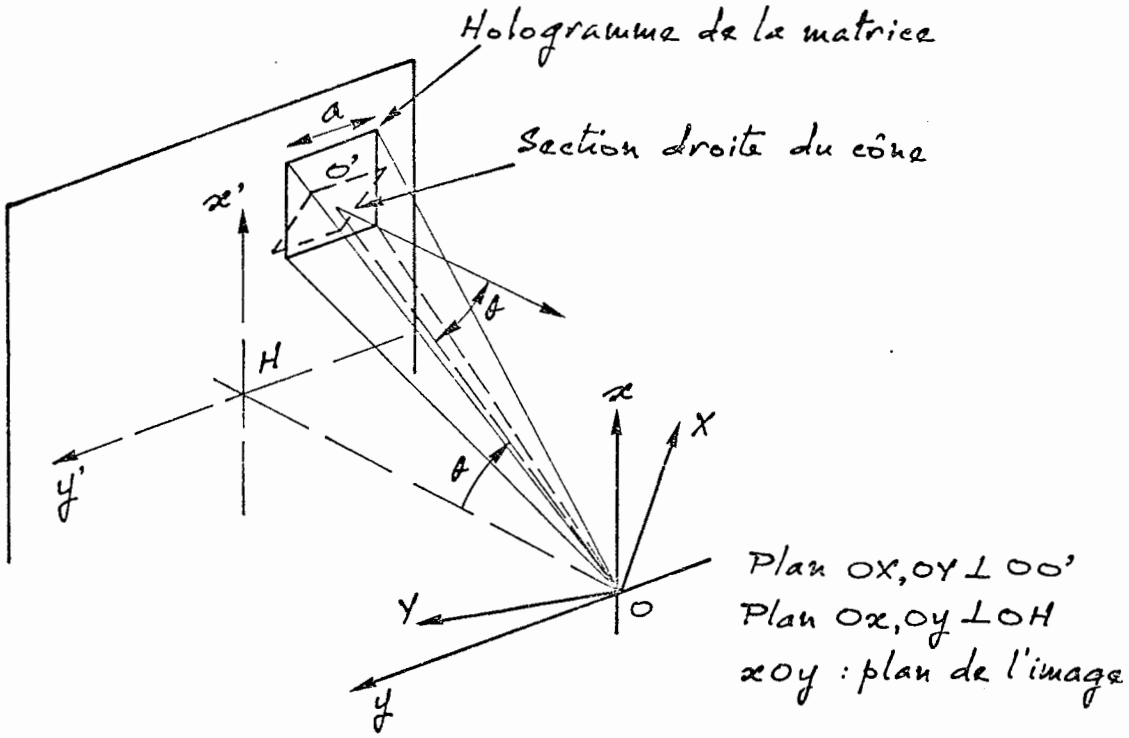
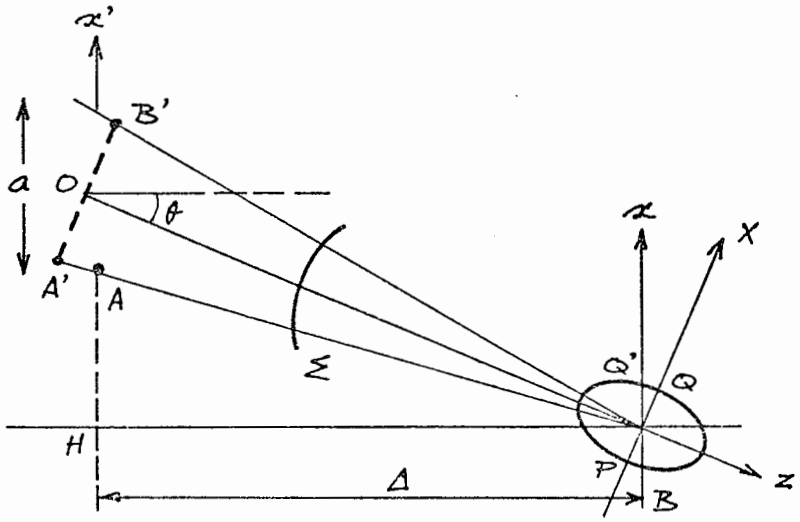


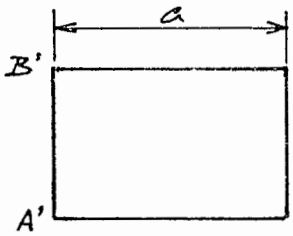
Figure 27

Le calcul est effectué pour les hologrammes situés sur les directions x'H et y'H, ce seul cas se prêtant aisément au calcul des sections droites et taches de diffraction.

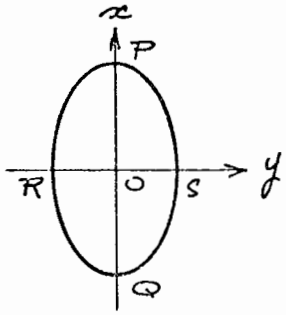


Section droite

Figure de diffraction dans le plan $\overrightarrow{OX}$, $\overrightarrow{OY}$



$A'B' = a \cos\theta$



$$PQ = \frac{2\lambda f}{a\cos\theta} \quad (f = OO')$$

$$RS = \frac{2\lambda f}{a}$$

Figure 28

Figure de diffraction dans le plan $\overrightarrow{Ox}$, $\overrightarrow{Oy}$

La figure de diffraction dans le plan x y est obtenue par intersection du volume de diffraction de forme elliptique centré sur l'axe OZ et du plan Ox, Oy (figure 29).

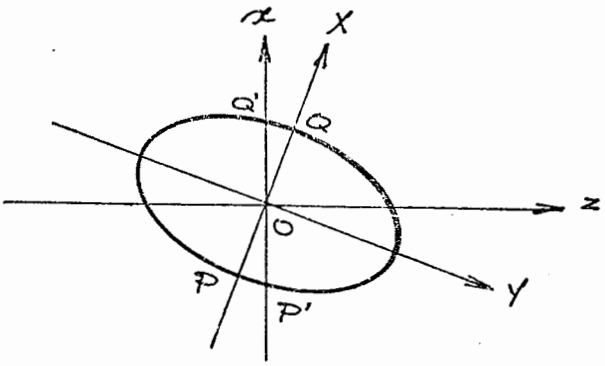


Figure 29

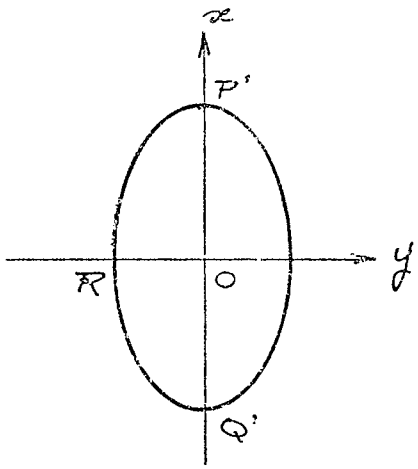
$$PQ = \frac{2\lambda f}{a\cos\theta}$$

$$OS \simeq \frac{2f^2\lambda}{a^2\cos^2\theta}$$

Puisque f $\gg$ a, l'ellipsoïde est très allongé suivant l'axe $\overrightarrow{OZ}$. On a donc dans le plan $\overrightarrow{Ox}$, $\overrightarrow{Oy}$:

$$P'Q' \simeq \frac{PQ}{\cos\theta} = \frac{2\lambda f}{a\cos^2\theta}$$

Forme d'un bit d'information dans le plan $\overrightarrow{Ox}$, $\overrightarrow{Oy}$ correspondant à l'angle de diffraction θ (figure 30)



$$P'Q' \simeq \frac{2\lambda f}{a\cos^2\theta}$$

$$RS = \frac{2\lambda f}{a}$$

Figure 30

VI.5 - Adaptation du bit elliptique à la matrice de détecteurs. Calcul de l'ellipticité tolérable.

L'ellipticité du bit d'information est déterminée par le rapport :

$$E = \frac{P'Q'}{RS} = \frac{2\lambda F}{a\cos^2\theta} \times \frac{a}{2\lambda F} = \frac{1}{\cos^2\theta}$$

Si on dispose d'une matrice de détection de pas d dont les éléments photosensibles de diamètre $\emptyset$ ne sont pas jointifs, ce qui correspond au cas d'une matrice de photodétecteurs réels, la condition pour que la détection soit possible sans ambiguité est que :

$$d \geqslant \frac{Q'P' + \emptyset}{2}$$

Si on choisit $\phi = \frac{RS}{2}$ on a la condition :

$$d = \frac{D_I}{\sqrt{N}} \geqslant \frac{\lambda f}{a \cos^2\theta} + \frac{\lambda f}{2a}$$

avec

$$f = \frac{\Delta}{\cos\theta}$$

$$\frac{D_I}{\sqrt{N}} \geqslant \frac{\lambda \Delta}{a \cos^3\theta} + \frac{\lambda \Delta}{2 a \cos\theta}$$

$$\frac{D_I}{\sqrt{N}} \geqslant \frac{\lambda \Delta}{a \cos\theta}\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\cos^2\theta}\right)$$

$$a = 2 k \lambda \sqrt{N}$$
$$\Delta = k D_I$$

$$\frac{D_I}{\sqrt{N}} \geqslant \frac{\lambda \times k D_I}{2 k \lambda \sqrt{N} \cos\theta}\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\cos^2\theta}\right)$$

$$\boxed{\frac{1}{\cos\theta}\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\cos^2\theta}\right) \leqslant 2}$$

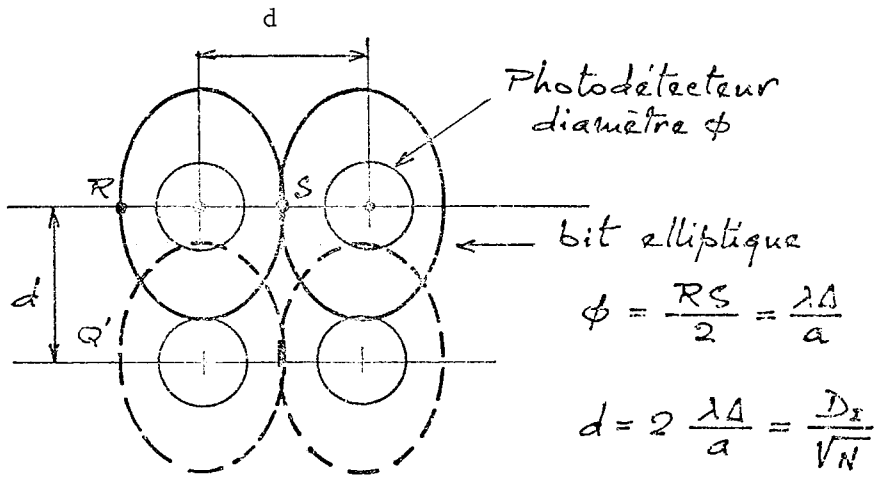


Figure 31

(taux de remplissage de la matrice de détection $\frac{\phi}{d} = \frac{1}{2}$)

Applications numériques

Calcul de l'angle θ_M satisfaisant à l'inégalité précédente :

$$\theta \leqslant \theta_M$$

avec

$$\frac{1}{\cos\theta_M}\left(\frac{1}{2}+\frac{1}{\cos^2\theta_M}\right) = 2$$

$$\frac{1}{\cos\theta_M} \simeq \sqrt[3]{2}$$

$$\cos\theta_M \simeq 0,795$$

$$\boxed{\theta_M \simeq 37°20'}$$

Le calcul précédent nous montre que les valeurs numériques de k et l'ouverture α adoptées pour la détermination des paramètres géométriques de la mémoire constituent des ordres de grandeurs convenables.

Avec de telles valeurs l'angle θ_M calculé par la relation $tg\,\theta_M = \frac{\sqrt{2}}{2}\left(\alpha + \frac{1}{k}\right)$ (figure 26) est égale à 41°, ce qui constitue une valeur légèrement supérieure à la limite calculée précédemment.

Situation correspondant à l'hologramme central ($\theta_0 = 0$) pour laquelle les effets d'ellipticité sont négligeables (figure 32)

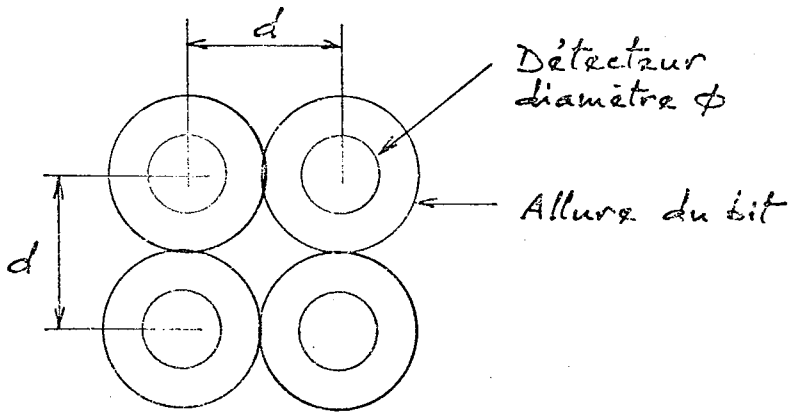


Figure 32

Il faut cependant noter que si on admet une ellipticité telle qu'elle corresponde à la figure 31 la modulation dans l'image va diminuer, et le niveau du signal sur chaque bit sera variable suivant que l'on adressera la page centrale ou la page située sur le bord du plan mémoire. Ces questions de tolérances concernant l'ellipticité des bits sont donc directement liées aux caractéristiques géomètriques et électriques de la matrice de détection (taux de remplissage, sensibilité) et conditionneront les performances dynamiques souhaitées pour la mémoire (débit d'informations, rapport signal/bruit à la détection et taux d'erreur).

L'inégalité précédente fournit donc uniquement un ordre de grandeur sur la valeur de l'angle de diffraction maximum θ_M. On peut noter d'autre part que cette valeur k = 5 permet d'obtenir un plan mémoire dont les dimensions restent suffisamment grandes devant celles de l'image restituée. Pour un hologramme donné, la résolution reste donc pratiquement uniforme dans toute l'image.

VI.6 - Calcul du nombre de points indépendants dans l'image

On dira que deux points dans l'image sont indépendants si les taches de diffractions de forme elliptique dans l'image ne se recouvrent pas. La géomètrie correspondante est indiquée sur la figure ci-dessous (figure 33).

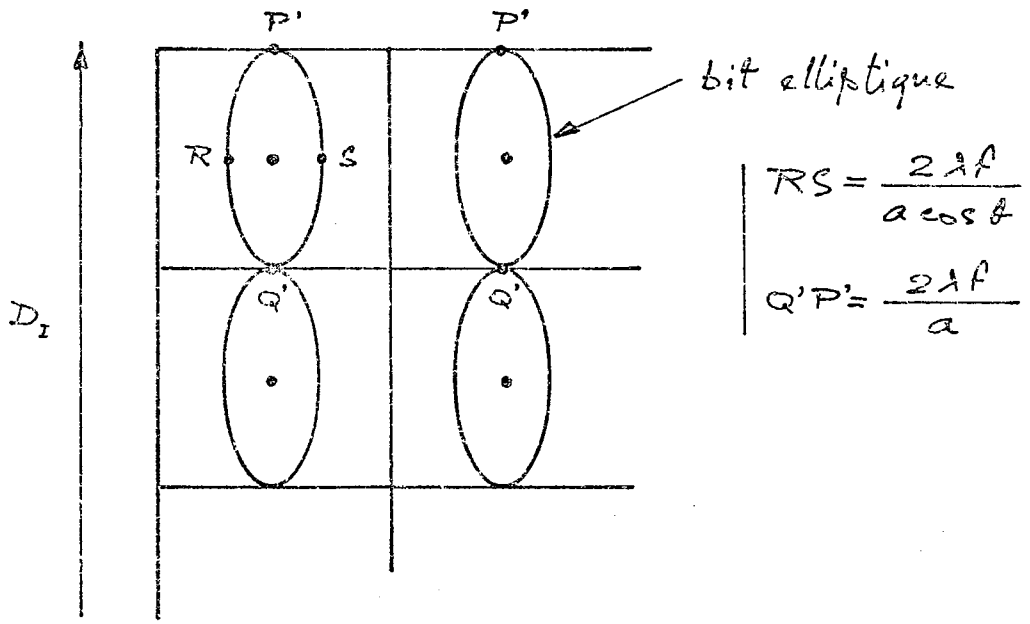


Figure 33

Le nombre de points indépendants qu'il est possible de stocker dans une image de surface D_I^2 vaut donc :

$$N = \frac{D_I^2}{P'Q'^2} = \frac{D_I^2}{4\lambda^2 f^2} a^2 \cos^4\theta$$

$$f = \frac{\Delta}{\cos\theta}$$

Soit :

$$N = \frac{D^2}{4\lambda^2\Delta^2} a^2 \cos^6\theta$$

$$\boxed{N = N_0 \cos^6\theta}$$

L'angle de diffraction θ pouvant atteindre des valeurs appréciables, cette loi de variation en $\cos^6\theta$ contribue à la diminution du nombre de points indépendants dans l'image.

Courbe de variation du nombre de points indépendants en fonction de l'angle θ (figure 34)

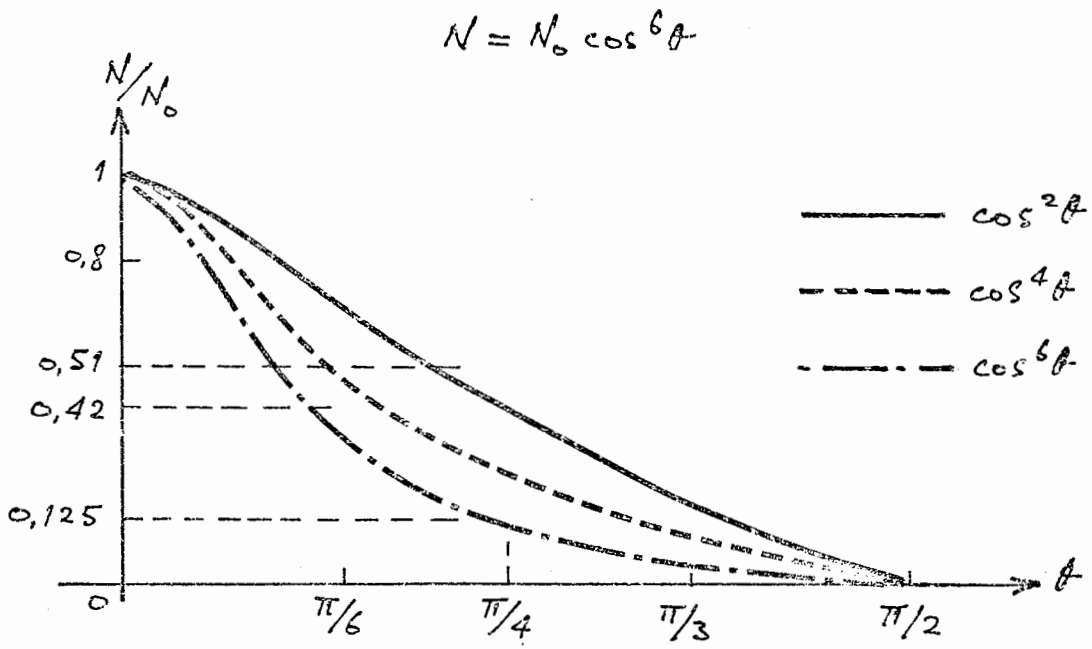
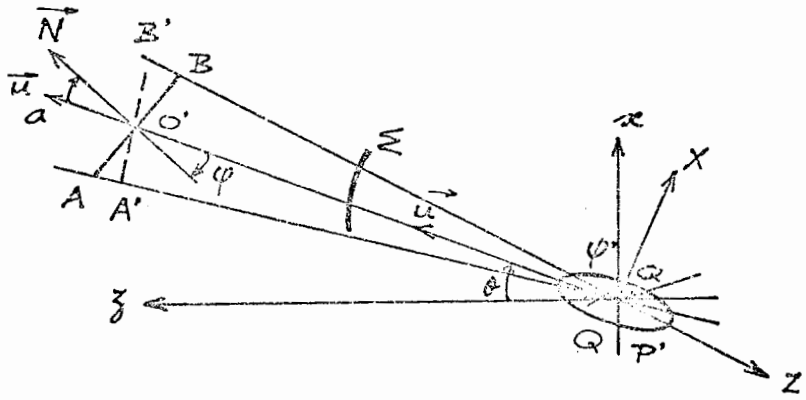


Figure 34

VI.7 - Compensation de la loi de variation

Les calculs précédents ont été effectués en supposant la matrice d'hologramme plane. Il s'agit ici de rechercher l'existence d'une surface de révolution sur laquelle seraient situés les hologrammes et telle que la résolution dans l'image soit constante c'est à dire indépendante de l'angle d'inclinaison θ .

Soit un hologramme AB, $\vec{N}$ la normale à AB φ, l'angle entre le rayon populaire $\vec{OO'} = \rho\vec{u}$ et la normale $\vec{N}$: (figure 35).



$\varphi = (\vec{N}, \vec{u})$

$OO' = \rho$

Figure 35

- Section droite du cône : A'B' = a cos φ
- Dimension du bit dans le plan OX, OY

$$PQ = \frac{2\lambda\rho}{u\cos\varphi}$$

- Dimension du bit dans le plan (Ox, Oy) :

$$d = P'Q' = \frac{2\lambda\rho}{a\cos\varphi} \cdot \frac{1}{\cos\theta}$$

- Surface effective du bit :

$$b^2 = \frac{4\lambda^2\rho^2}{a^2\cos^2\varphi} \cdot \frac{1}{\cos^2\theta}$$

- Nombre de points indépendants dans l'image :

$$N = \frac{D^2}{b^2} = \frac{D^2}{4\lambda^2\rho^2} \cdot a^2 \cdot \cos^2\varphi \cdot \cos^2\theta$$

$$N = \frac{D^2}{4\lambda^2} \cdot \frac{a^2}{\Delta^2} \cdot \frac{\Delta^2}{\rho^2} \cdot \cos^2\varphi \cdot \cos^2\theta$$

$$N = N_c \cdot \frac{\Delta^2}{\rho^2} \cdot \cos^2\varphi \cdot \cos^2\theta$$

Pour que la résolution soit indépendante de l'angle θ il est nécessaire de satisfaire la condition :

$$\rho^2 = \Delta^2 \cos^2\varphi \cos^2\theta$$

La courbe satisfaisant à cette relation est indiquée sur la figure 36. Pour chaque hologramme l'angle φ est égale à $\pi/2$ et la coordonnée radiale ρ est proportionnelle à cos θ .

Le centre de chaque hologramme est donc situé sur une sphère dont le diamètre est égal à Δ .

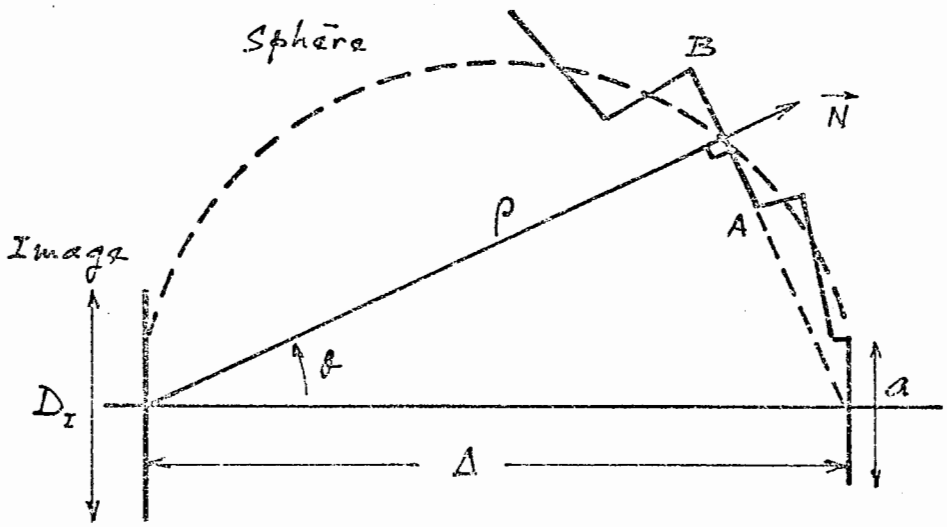


Figure 36

Le cercle de diamètre Δ correspond à une étendue de faisceau constante entre le plan de l'hologramme et celui de l'image.

En pratique le plan mémoire sera donc constitué par des plaquettes de dimensions réduites (ex : plaques photographiques 5 x 5) disposées suivant le schéma indiqué sur la figure 36, chacune d'elle contenant par exemple 10^3 pages holographiques.

VI.8 - Capacité de stockage d'un plan infini

Considérons un plan infini constitué par une répartition circulaire d'hologrammes, chacun d'eux ayant un diamètre constant égal à a (pour ce type de calcul il est plus simple d'utiliser cette répartition que le matricage en x, y) figure 37.

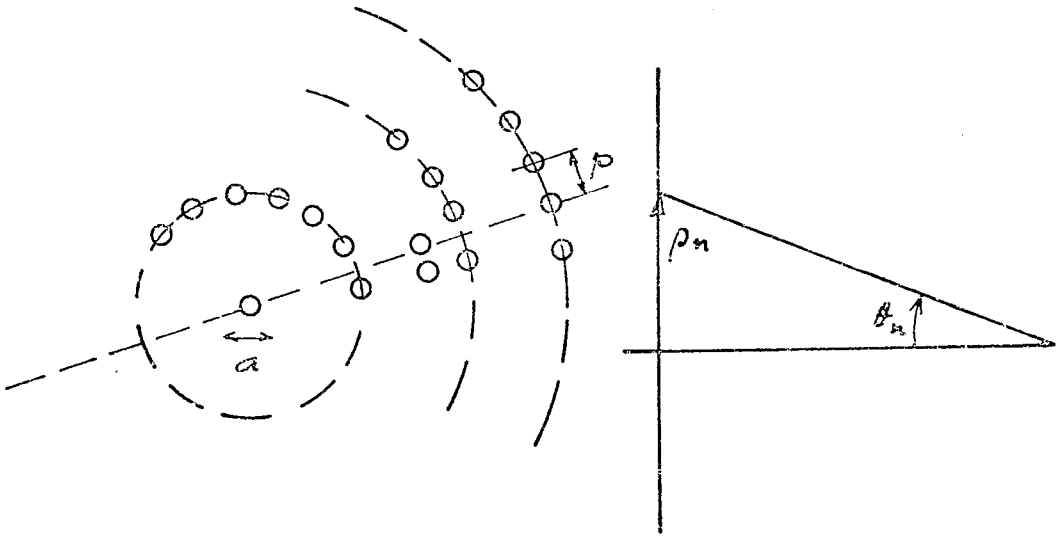


Figure 37

Soit p la distance entre deux hologrammes consécutifs sur un cercle de rayon $\rho_n = np$

Le nombre d'holograme sur un cercle de rayon $\rho_n = np$ vaut :

$$N_n = \frac{2\pi\rho_n}{p} = \frac{2\pi np}{p}$$

$$N_n = 2\pi n$$

On admet que le nombre de bits qu'il est possible de stocker sur le cercle de rayon ρ_n vaut :

$$P_n = 2\pi n . N_0 \cos^6\theta_n$$

Or,

$$\rho_n = \Delta \, tg\, \theta_n = np$$

Soit :

$$n = \frac{\Delta}{p} \, tg\, \theta_n$$

$$P_n = 2\pi N_0 n \left[\frac{1}{1+tg^2\theta} \right]^3$$

$$P_n = 2\pi N_0 n . \frac{1}{\left(1+\frac{n^2 p^2}{\Delta^2}\right)^3}$$

La capcité totale du plan vaut :

$$N = N_0 + \sum_1^\infty P_n$$

$$N = N_0 + \sum_1^\infty 2\pi N_0 \frac{n}{\left(1+\frac{n^2 p^2}{\Delta^2}\right)^3}$$

Courbe de variation du nombre de bits sur un cercle de rayon ρ_n (figure 38)

$$P_n = 2\pi \frac{N_0 \Delta}{p} \cdot \sin\theta_n \cdot \cos^6\theta_n$$

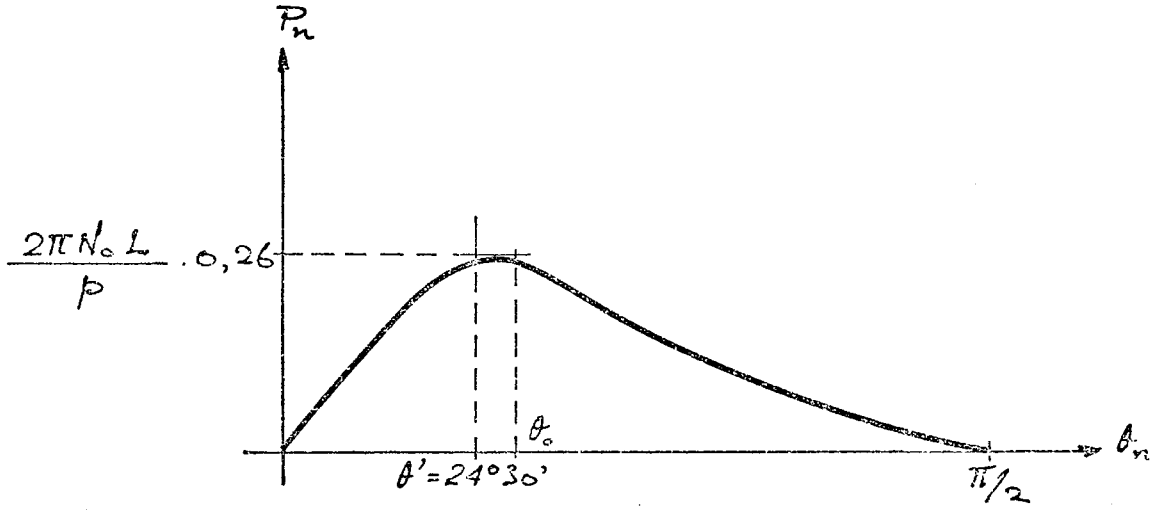


Figure 38

La courbe passe par un maximum pour l'angle :

$$\theta' = 24°30' \left[tg\,\theta' = \frac{1}{\sqrt{5}} \right]$$

Pour $0 \leq \theta \leq \theta'$ le nombre d'hologramme augmente plus vite que la résolution ne diminue, par contre pour $\theta > \theta'$ c'est le phénomène inverse qui se produit la résolution diminue plus rapidement que n'augmente le nombre d'hologrammes sur un cercle de rayon ρ_n (figure 39).

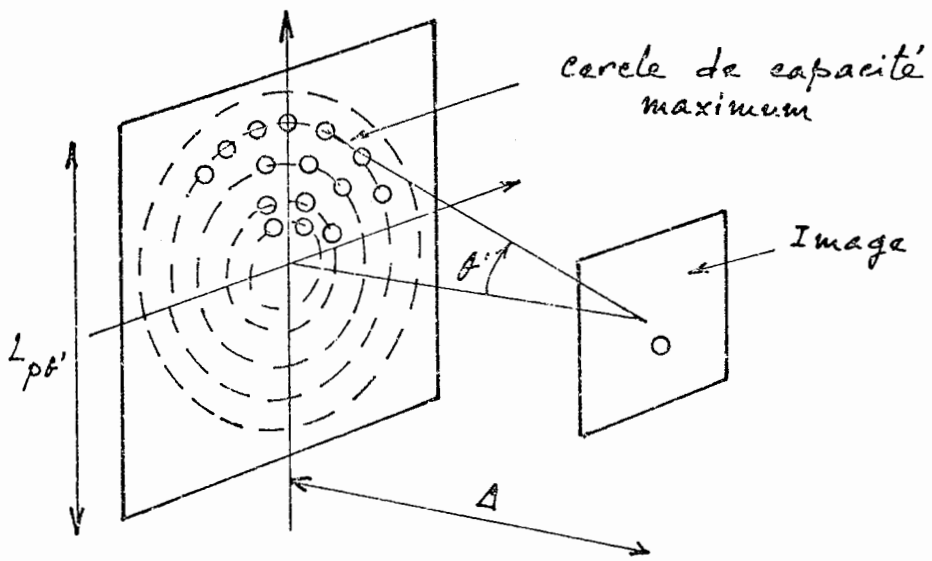


Figure 39

Ce cercle de capacité maximum correspond pratiquement à une ouverture égale à l'unité :

$$2\rho_{\theta'} \simeq \Delta \qquad (\alpha \simeq 1)$$

Calcul de la capacité du plan infini

Elle s'obtient par calcul de la somme de la série :

$$N = N_0 + 2\pi N_0 \sum_1^{\infty} \frac{n}{\left(1+\frac{n^2\rho^2}{\Delta^2}\right)^3}$$

Un ordre de grandeur de la somme de la série peut être obtenu par le calcul de l'intégrale :

$$N \simeq N_0 + \alpha \pi N_0 \int_1^{\infty} \frac{n\,dn}{\left(1+\frac{n^2\rho^2}{\Delta^2}\right)^3}$$

$$N \simeq N_0 + \pi N_0 \int_{1+\frac{n^2\rho^2}{\Delta^2}}^{\infty} \frac{L^2}{\rho^2} \cdot \frac{du}{u^3}$$

$$N \simeq N_0 + \frac{\pi N_0}{2} \cdot \frac{\Delta^2}{\rho^2} \cdot \frac{1}{\left(1+\frac{\rho^2}{\Delta^2}\right)^2}$$

$$\rho \ll L$$

$$N = N_0 + \frac{\pi N_0 \Delta^2}{2p^2}$$

On pose : $p = \frac{a}{\mathcal{E}}$; $N_0 = \frac{1}{4} \cdot \frac{a^2 D^2}{\lambda^2 \Delta^2}$

$$N \simeq N_0 + \frac{\pi}{8} \cdot \frac{D^2 \mathcal{E}^2}{\lambda^2}$$

Applications numériques

$\mathcal{E}^2 = 1/2$

$\lambda = 0,5\ \mu$

$D_I = 1,5$ cm	$N = 1,7\ 10^8$
$D_I = 15$ cm	$N = 1,7\ 10^{10}$
$D_I = 150$ cm	$N = 1,7\ 10^{12}$

Les capacités calculées ci-dessus sont comparables à celles obtenues au paragraphe pour une dimension d'image équivalente. Ceci montre en particulier que la limitation du plan mémoire à $D_H = \Delta$ constitue un optimum qu'il est pratiquement inutile de dépasser.

VI. 9 - Conclusions relatives à l'étude de la capacité

Les calculs concernant la capacité de la mémoire organisée par pages nous o ont montré que pour une ouverture donnée du plan mémoire, la capacité est uniquement fonction de la dimension de l'image restituée.

Pour un taux de remplissage du plan mémoire qui pratiquement sera compris entre 1/2 et 1/4, les densités théoriques de stockage atteintes sont de l'ordre de 10^6 à $2\ 10^6$ bits/cm^2. En conséquence, la réalisation d'une capacité 10^{10} bits, nécessite un plan mémoire dont les dimensions sont comprises entre 70 x 70 cm ou 1 x 1 m suivant le taux de remplissage et la longueur d'onde considérée.

En adoptant des dimensions raisonnables du plan mémoire ($D_H \leqslant$ 1m) la capacité est donc limitée à 10^{10} bits avec l'organisation classique toujours considérée ici : un plan mémoire composé d'une matrice de petits hologrammes, un

seul enregistrement holographique par pages, et une seule matrice de détection. Une telle capacité nécessite cependant la réalisation de mosaïques de détecteurs de grandes dimensions ($20 < D_I < 30$ cm).

Pour l'obtention de mémoires dont les capacités sont supérieures à 10^{10} bits et pouvant atteindre 10^{12} bits il est donc indispensable de rechercher une nouvelle organisation permettant la superposition des pages. Afin d'augmenter la capacité sans multiplier le nombre de composants (plan mémoires et matrices de détection) et tout en conservant un accès aléatoire rapide à chaque bloc d'information, il est donc nécessaire d'utiliser les techniques de superposition d'hologrammes en chaque point du plan mémoire. Dans ce cas des capacités de l'ordre de $10^{11} \div 10^{12}$ bits peuvent être envisagées par superposition de 10^2 pages dans un matériau photosensible épais. Nous décrirons dans le paragraphe VII.4 un dispositif d'adressage particulier permettant un accès aléatoire à un angle porteuse-objet quelconque..

Nous avons également étudié de façon précise l'influence de l'angle de diffraction θ sur la forme des bits restitués dans le plan de l'image. Lorsque les angles θ deviennent grands ($\theta > 20°$) les taches de diffraction deviennent elliptiques. L'image restituée étant adaptée à une matrice de détection dont le taux de remplissage est de l'ordre de 1/4, l'ellipticité tolérable pour les bits d'information correspond à des angles de diffraction de l'ordre de 40°. De tels angles concernent les hologrammes situés sur le bord du plan mémoire et sont les plus défavorisés quant à la résolution. En fonction de ces différents phénomènes on a pu montrer que l'ouverture $\alpha = 1$, constitue un optimum qu'il est inutile de dépasser, et que un rapport 5 entre les dimensions respectives du plan mémoire et de l'image, permet d'obtenir, pour un hologramme donné un résolution pratiquement constante dans toute l'image.

Enfin on a pu calculer que la perte de résolution dans l'image due à l'ellipticité des bits pouvait être compensée en disposant convenablement les hologrammes sur une surface.

VII - ORGANISATION ETUDIEE AU LABORATOIRE

VII.1 - Description

L'organisation adoptée est celle d'une mémoire holographique inscriptible et effaçable.

Les idées générales concernant l'organisation d'une telle mémoire ainsi que les systèmes d'enregistrement utilisant des réseaux de lentilles ont été présentés dans le chapitre IV.

Faisceau objet (figure 40)

Le déflecteur acousto-optique D est placé au foyer de l'objectif O_1. Le faisceau issu de O_1 se translate donc parallèlement à lui-même, quelque soit l'angle de déflexion θ. L'éclairage du plan des données est réalisé à l'aide du système optique décrit sur la figure 1 (réseau de lentilles à axes droits - objectif de champ O_2). Le plan des données est placé contre la pupille de l'objectif O_3 utilisé au grandissement -1. Dans le plan π on obtient donc le spectre du plan objet.

Onde porteuse (figure 40)

Un séparateur de faisceau S est placé à la sortie du déflecteur D.

Deux lentilles L_1 et L_2 identiques et un miroir M permettent d'obtenir en D' l'image du déflecteur D avec un grandissement -1. A une valeur θ de l'angle de déflexion en D correspond donc l'angle $-\theta$ en D'.

L'image D' est placée au foyer de l'objectif O'_1 identique à O_1 (focale et diamètre identiques). Le faisceau issu de cet objectif se translate donc parallèlement à lui-même. Le réseau holographique R_H défléchit le faisceau sur le plan mémoire ainsi qu'il est indiqué sur la figure 40

Quelque soit l'adresse X-Y choisie sur le déflecteur, on constate qu'un tel schéma satisfait aux trois conditions mentionnées au paragraphe V.1. Le faisceau de lecture est identique à l'onde porteuse, l'image réelle étant projetée sur la matrice de détection à l'aide de la lentille de projection L_p.

VII.2 - Caractéristiques géomètriques du montage réalisé

Le montage décrit é été réalisé en utilisant un déflecteur acousto-optique suivant une dimension.

Le réseau de lentilles est constitué par une matrice de 10 x 10 lentilles plan convexes montées dans une grille métallique et collées sur une plaque de verre.

Les caractéristiques géomètriques du montage sont indiquées ci-dessous :

- Objectifs O_1 et O'_1 $\emptyset$ = 20 cm
  F = 120 cm
- Réseau de lentilles 10 x 10
  . Diamètre de chaque lentille = 3 mm
  . Focale f = 10 mm
  . Pas de la matrice p = 6 mm
- Objectif O_2-F = 60 cm
  . Dimensions : 21 x 27 cm
- Objectif O_3
  . Grandissement -1
  . Focale : 30 cm
  . Diamètre : 5 cm
  . Distance : L H = 120 cm
- Plan de données
  . 10^4 bits d'informations
  . Dimensions : 30 x 30 mm
  . Dimension du bit = 300 μ
- Lentilles L_1 et L_2
  . $\emptyset$ = 6 cm
  . Focale = 40 cm
- Réseau holographique :
  . Dimensions : 55 x 55 mm
  . Angle de déflexion à 6328 Å = 45°

A l'aide de ce système nous avons enregistré une ligne de 9 hologrammes dont les caractéristiques sont rappelées ci-dessous (déflexion dans le plan horizontal).

- Nombre d'hologrammes : 9
- Nombre de bits par page : 10^4
- Diamètre de l'hologramme : 2 mm
- Pas de la ligne : 6 mm
- Image restituée : 30 x 30 mm

- Distance image hologramme = 600 mm
- Rendement ≃ 1%

Le système ayant servi à l'enregistrement est indiqué sur la figure III.

On détermine la qualité de l'image par "balayage" de ce plan à l'aide d'un trou d'exploration relié à une fibre optique et un photomultiplicateur.

Deux diamètres de trou d'exploration ont été utilisés : $\emptyset = 75\ \mu$; $\emptyset = 200\ \mu$ (la dimension du bit est de $300\ \mu$). Les courbes correspondantes sont indiquées sur les figures IV et V.

On constate une dispersion d'un facteur 2 sur les bits 1 dans toute l'image.

La figure V permet de déterminer le rapport K entre les extremums d'énergie détectée à l'aide du trou d'exploration de $200\ \mu$.

Cette mesure nous fournit la valeur maximum du rapport d'énergie entre le signal 0 et 1 qui serait obtenu à l'aide d'une matrice de détection de $300\ \mu$ de pas, chaque photodiode possédant un diamètre de $200\ \mu$.

On obtient en moyenne :

$$K = \frac{S(0)}{S(1)} = \frac{1}{10} = 10\%$$

A l'aide du trou d'exploration de $75\ \mu$ ce même rapport vaut en moyenne 1/70 :

$$K = \frac{S(0)}{S(1)} = \frac{1}{70} = 1{,}4\%$$

Pour une détection dynamique ces rapports constituent un paramètre important car ils fixeront pour une puissance optique donnée dans l'image, les caractéristiques de débit pour une matrice de détection de technologie déterminée.

VII.3 - Stockage holographique dans les matériaux épais par rotation de l'onde de référence

On sait que si on désire réaliser une mémoire holographique dont la capacité soit supérieure à 10^{10} bits un certain nombre de limitations s'introduisent au niveau des dimensions géométriques du plan mémoire et de l'image restituée.

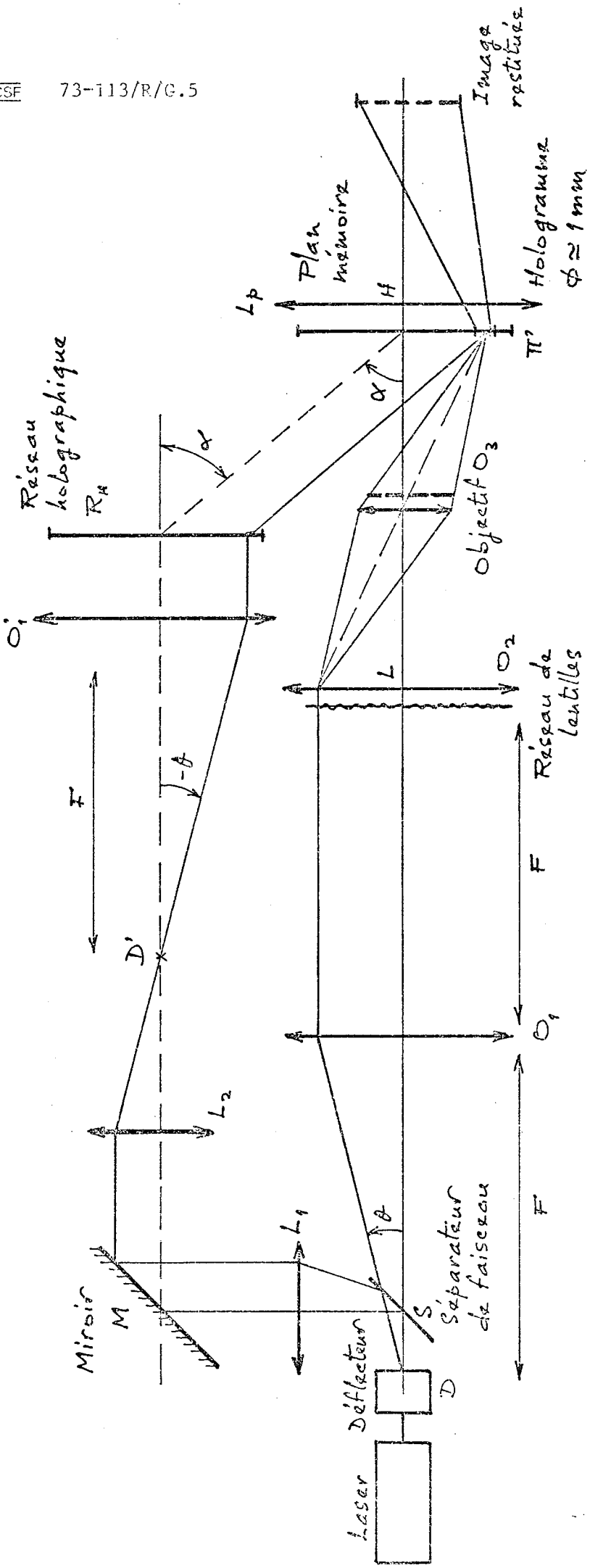


Image restituée
Plan mémoire
Holographie
$\phi \simeq 1$ mm
L_p
H
π'
α
Réseau holographique
R_H
α
Objectif O_3
O_1'
O_2
L
Réseau de lentilles
F
$-\beta$
F
D'
O_1
L_2
L_1
β
F
Miroir
M
S
Séparateur de faisceau
Déflecteur
D
Laser

Figure 40

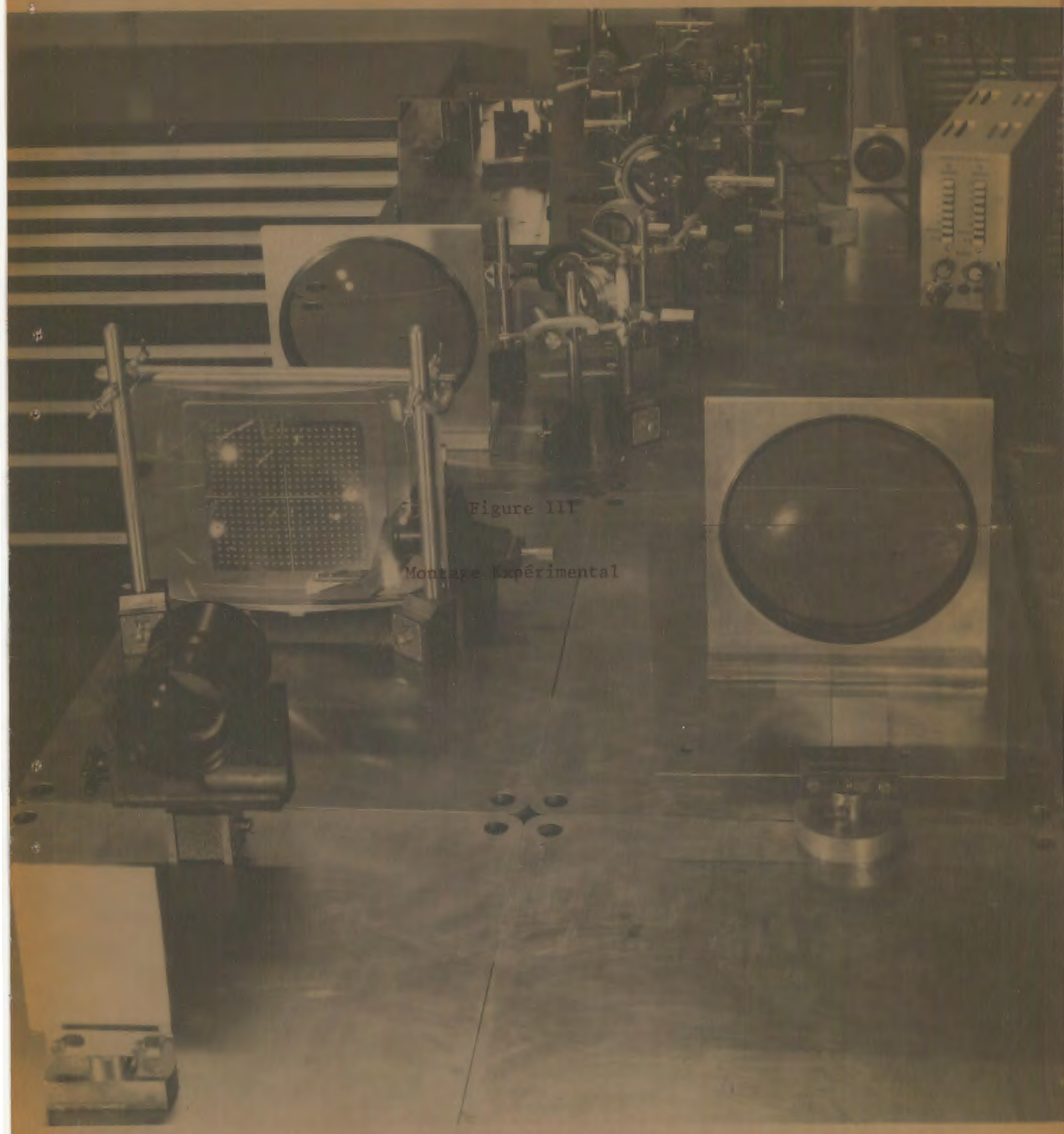


Figure III

Montage Expérimental

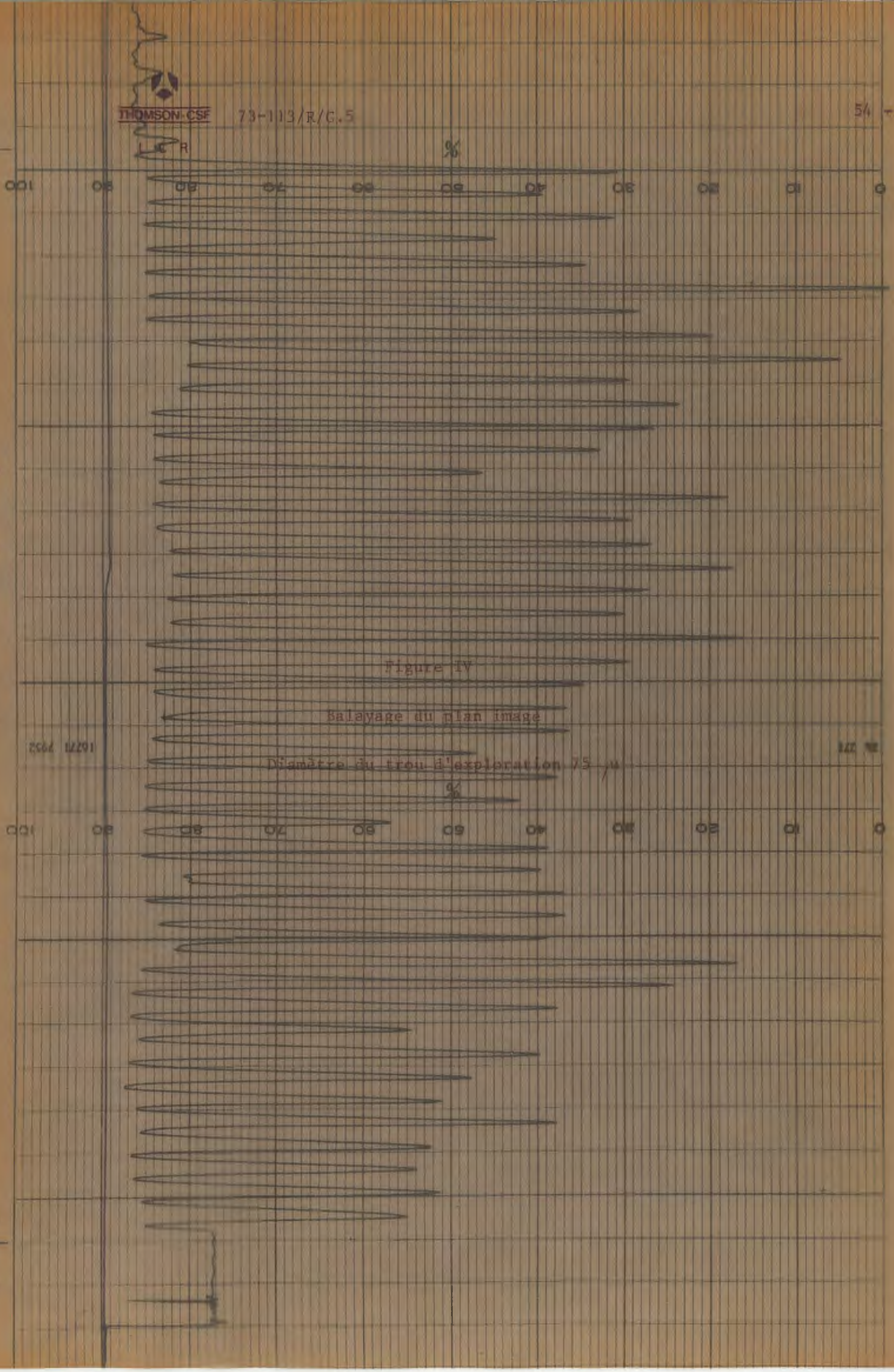


Figure IV

Balayage du plan image

Diamètre du trou d'exploration 75 μ

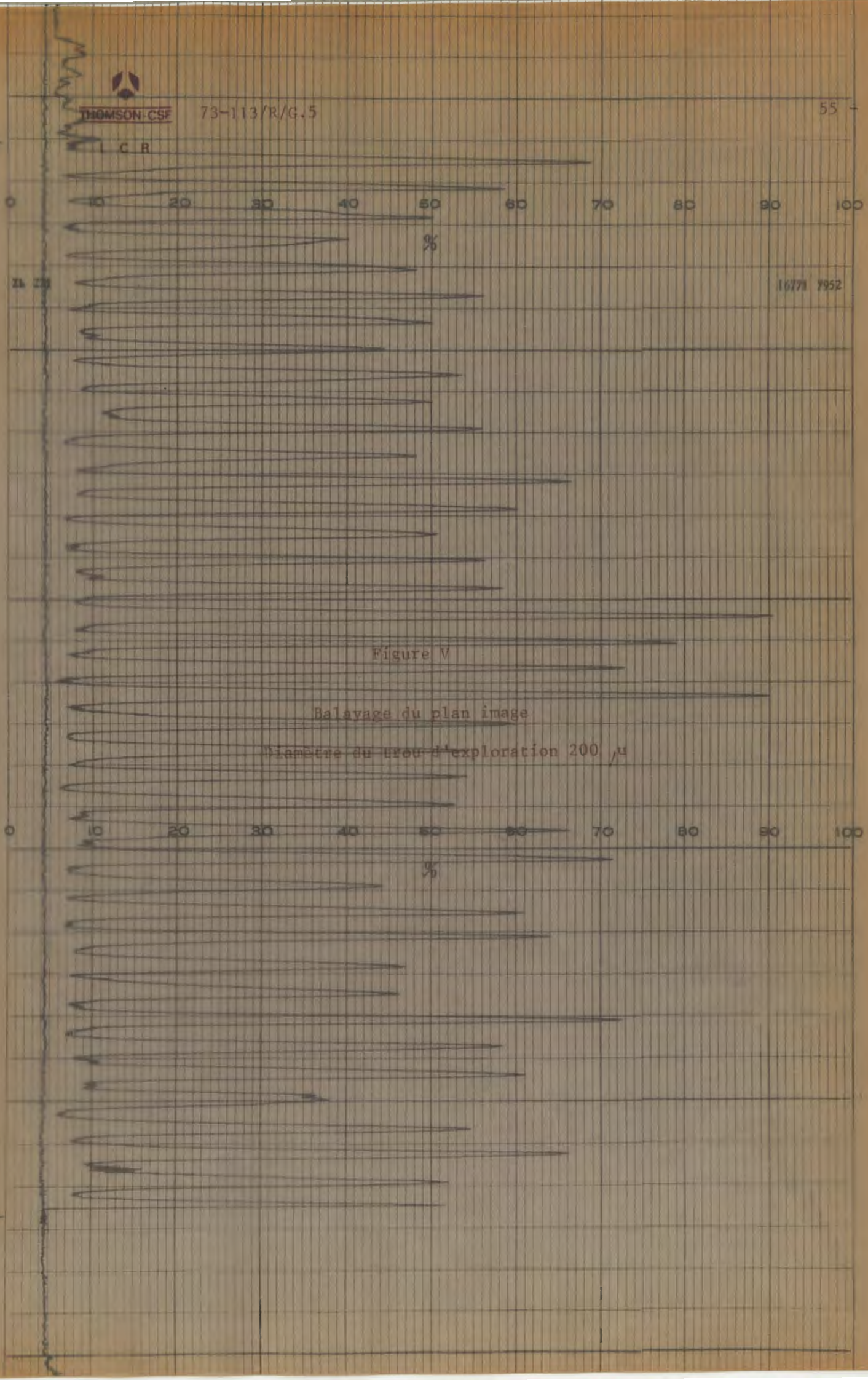


Figure V

Balayage du plan image

Diamètre du trou d'exploration 200 μ

Il devient dans ce cas nécessaire d'utiliser un matériau photosensible épais ($d \gg \lambda$) permettant la superposition d'hologrammes par variation de l'angle entre l'onde porteuse et l'onde objet en tout point du plan mémoire. Dans ce cas la capacité de la mémoire s'écrit donc sous la forme du produit C = M x N x P.

M étant le nombre de positions d'adressage du déflecteur, N le nombre de bits par page, et P le nombre d'hologrammes superposés.

Nous allons montrer que l'organisation présentée est compatible avec la superposition des hologrammes par variation de l'angle porteuse-objet.

La position du plan mémoire est telle que les deux points H_1 et H'_1 sont conjugués à travers le réseau holographique (figure 41).

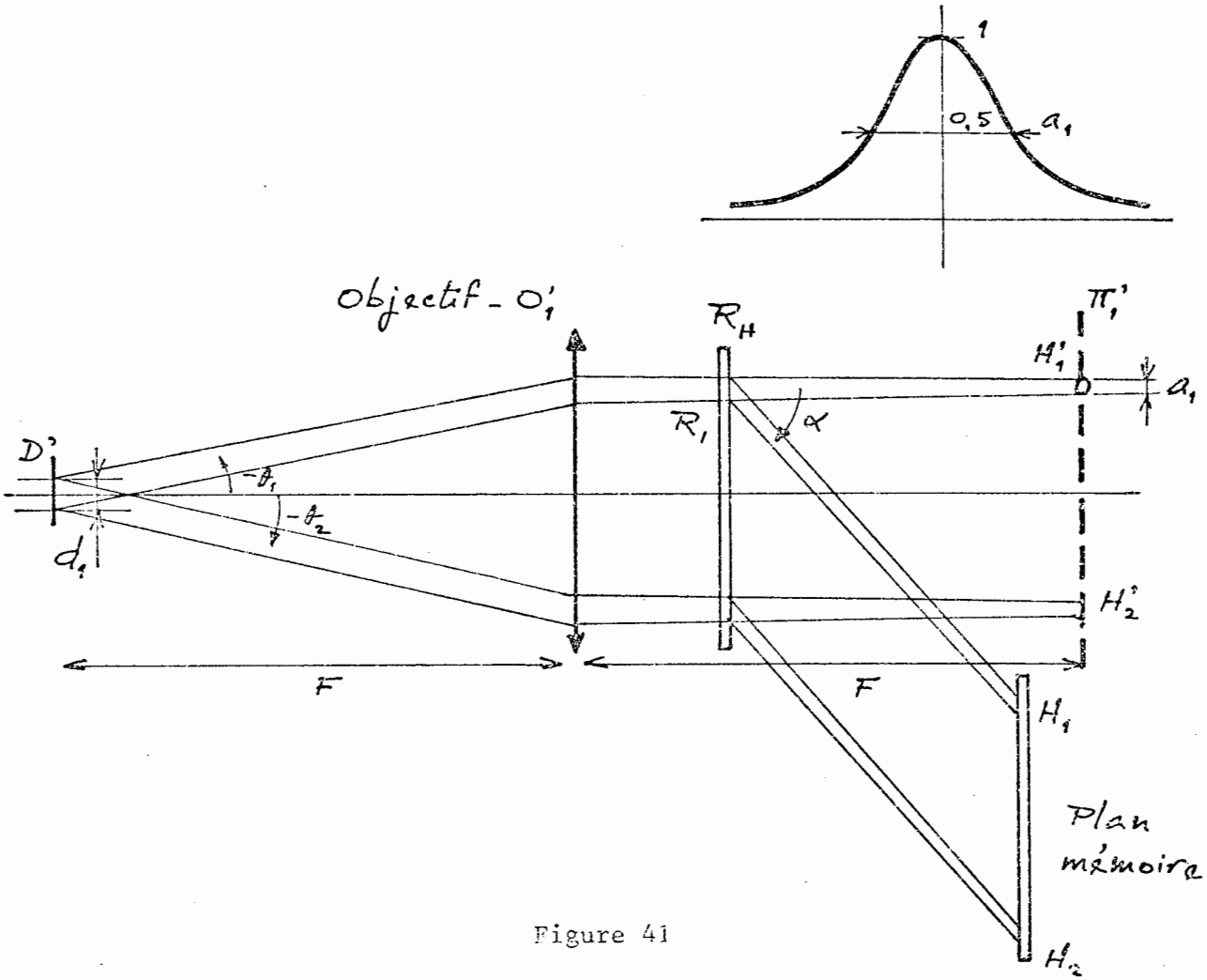


Figure 41

Si on translate à l'aide d'un déflecteur convenable la pupille D' de façon que le faisceau reste parallèle à lui-même, le faisceau issu de l'objectif

O'_1 pivote alors autour du point fixe H'_1 puisqu'il existe une relation de transformée de Fourier entre 2 plans D' et π'_1 (figure 43).

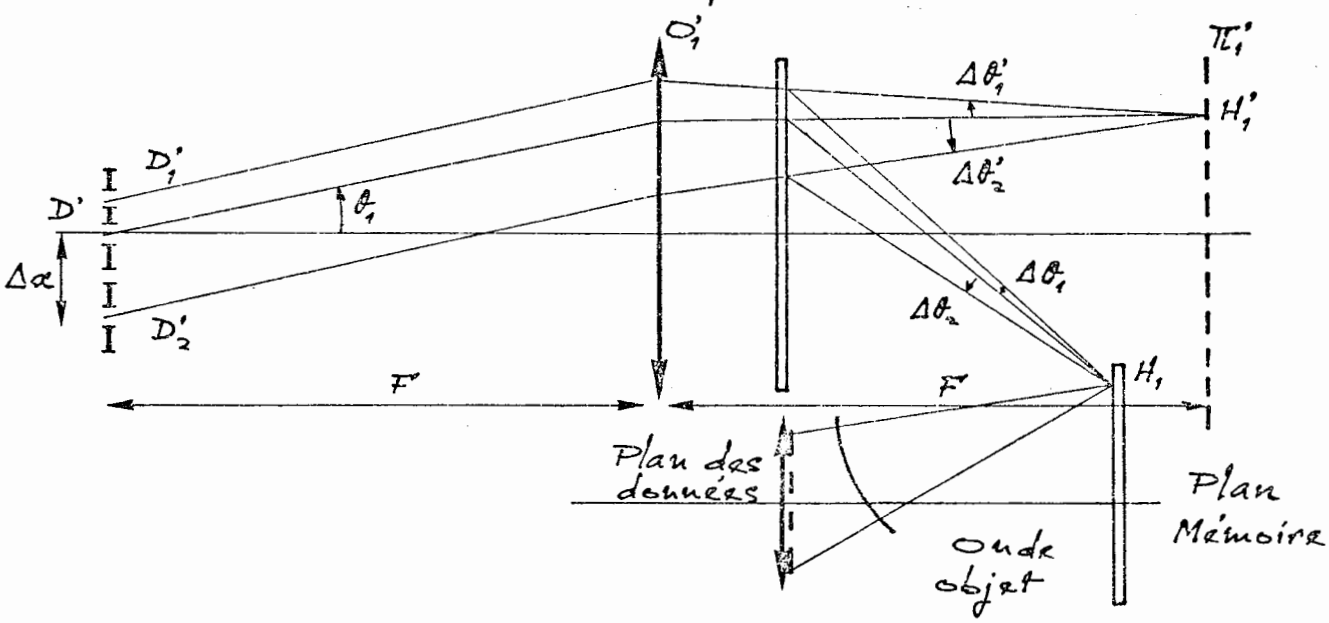


Figure 43

A une translation Δx, correspond une variation angulaire $\Delta\theta$ telle que :

$$\Delta\theta = \frac{\Delta\theta'}{\cos\alpha} = \frac{\Delta x}{\cos\alpha} \times \frac{1}{F}$$

Le même effet de rotation est obtenu autour du point H_1 image de H'_1 à t travers le réseau holographique R_H. En ce point vient coïncider le spectre du plan des données, ce qui permet l'enregistrement de l'hologramme.

Pour enregistrer ou lire l'hologramme deux opérations de déflexion sont nécessaires.

- un premier déflecteur XY D_1 choisit l'angle θ correspondant à un point du plan mémoire.

  (H'_1 par exemple sur la figure 43).

- un second déflecteur XY D_2 réalise une translation de l'onde porteuse. Il permet de choisir l'angle entre l'onde porteuse et l'onde objet.

A l'aide de telles solutions il apparaît donc possible d'envisager des capacités de 10^{12} bits qui seraient obtenues par superposition de $10 \times 10 = 10^2$ hologrammes en chaque point du plan mémoire.

Ces questions de superposition seront précisées dans les paragraphes suivants. On précisera les caractéristiques du déflecteur D_2 à utiliser ainsi que sa position dans la mémoire.

VII.4 - Dispositif de déflexion acousto-optique permettant la rotation de l'onde porteuse.

Le système utilise deux déflecteurs acousto-optiques dont le second est dans le spectre du premier. Le schéma de principe est indiqué sur la figure 44.

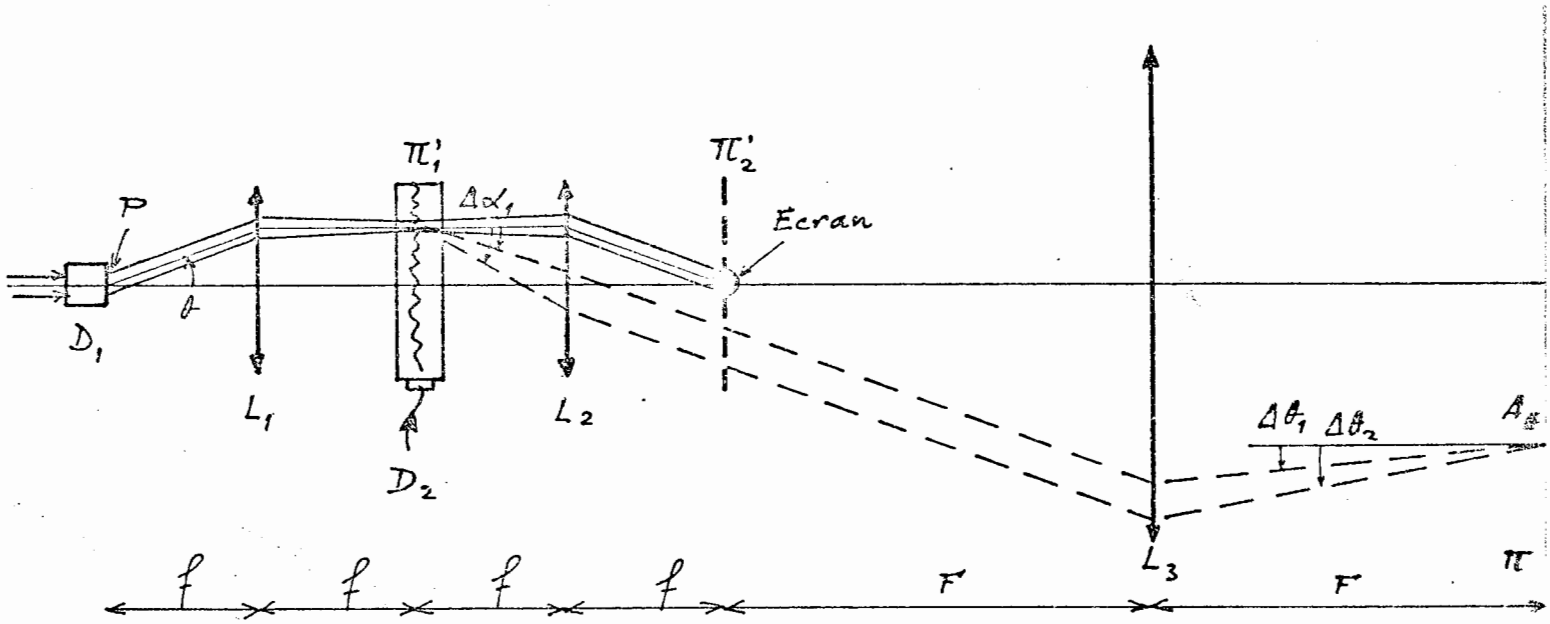


Figure 44

Soit D_1 le premier déflecteur permettant d'adresser un point A_θ quelconque du plan mémoire π. Dans le plan focal de π'_1 de la lentille L_1 on place un second déflecteur D_2. Soit $\Delta\alpha$ l'angle de déviation du faisceau qui est fonction du pas du réseau ($\Delta\alpha = \frac{\lambda}{\Lambda ac}$). Dans le plan focal π de la lentille L_3 on obtient donc une rotation du faisceau autour du point A_θ telle que :

$$\Delta\theta = \frac{\Delta x}{F} = \frac{f\alpha}{F}$$

$$\boxed{\Delta\theta = f\,\frac{\Delta\alpha}{F}}$$

Un tel système satisfait donc aux deux conditions mentionnées dans le paragraphe VII.3 :

- le premier déflecteur D_1 choisit un point quelconque A_f du plan mémoire,
- le second déflecteur D_2 choisit l'angle d'incidence $\Delta\theta$ correspondant au point A_f. En ce point on a donc un accès aléatoire à l'une quelconque des positions entre le faisceau objet et l'onde porteuse.

Nous allons montrer que ce système de déflection peut être incorporé dans l'organisation décrite dans le paragraphe VII . Puisque les éléments de déflection sont du type acousto-optique, ils doivent être placés avant le séparateur de faisceau S. Le système est au foyer de l'objectif O_1. (figure 40). La marche des faisceaux correspondant à la translation de la pupille est indiquée sur la figure VI.

Notons que dans le plan du réseau de lentilles le faisceau pivote sur chaque lentille. Pour que l'objectif O_3 soit toujours éclairé il suffit donc que la surface d'onde issue de l'objectif O_2 ait un diamètre convenable ; (ce diamètre est uniquement déterminé par la distance focale du réseau de lentilles). Figure 45).

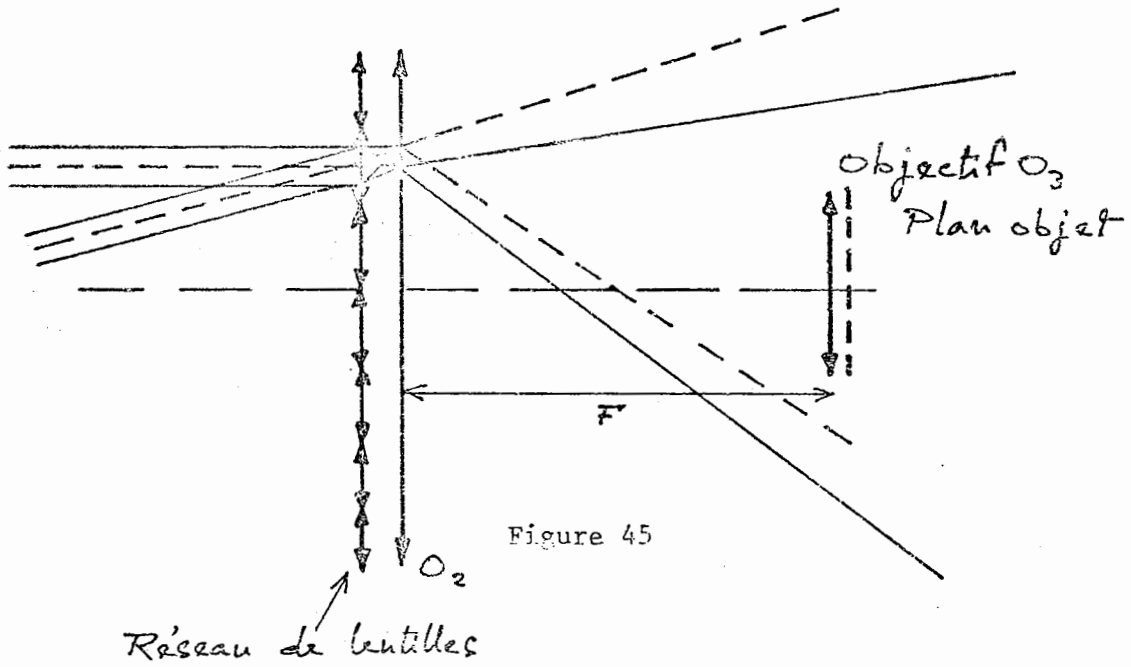


Figure 45

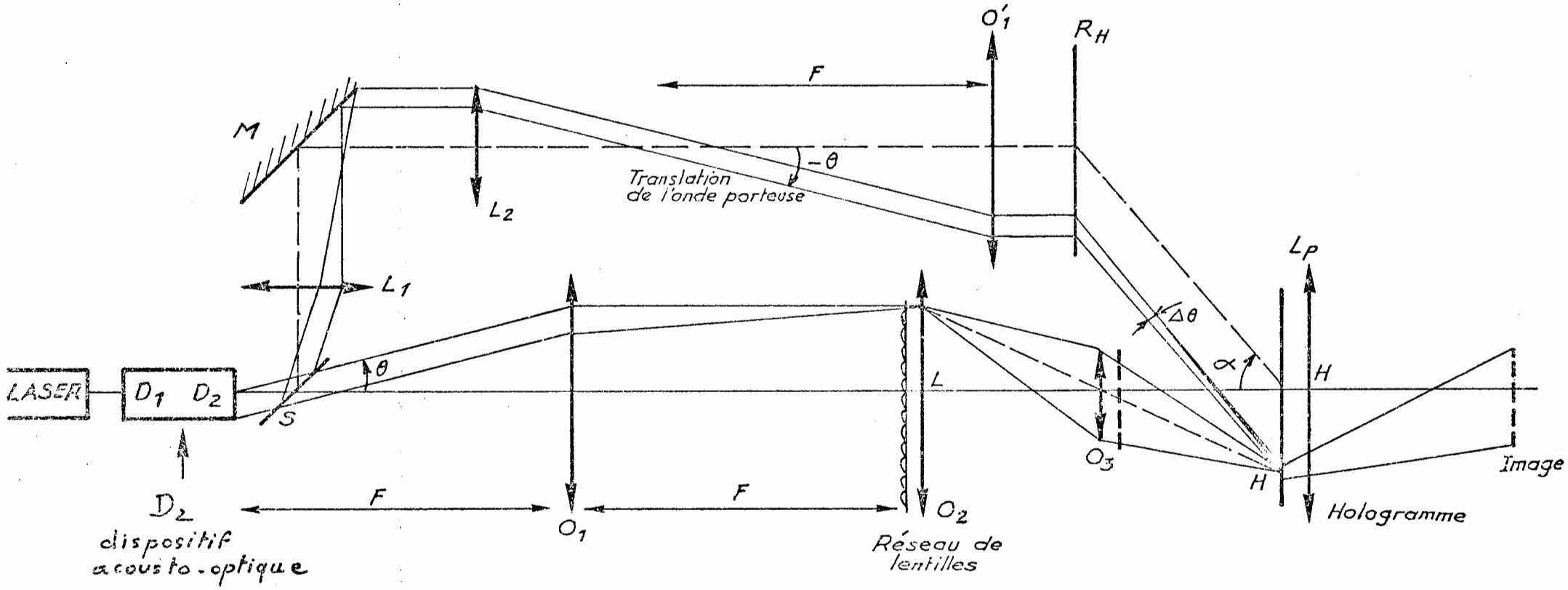

LASER
D_1 D_2
D_2
dispositif acousto-optique
S
M
L_1
L_2
θ
F
O_1
F
O_2
Réseau de lentilles
L
O_3
O'_1
R_H
Translation de l'onde porteuse
−θ
Δθ
α
H
H
L_P
Hologramme
Image

FIGURE VI

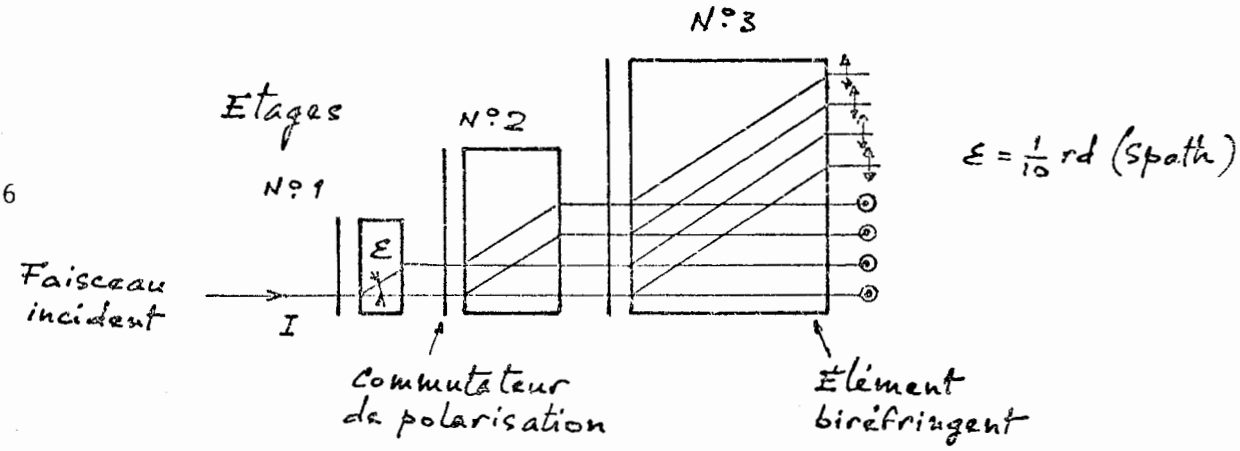
paragraphe.

VII.5 - Dispositif de déflexion électro-optique permettant la rotation de l'onde porteuse

Le même effet de translation de l'onde porteuse pourrait être réalisé à l'aide d'un translateur de faisceau électro-optique. (23).

Le système se compose d'une série de lames birégringentes, chacune d'elles étant précédée d'un commutateur de polarisation électro-optique. Par commutation convenable des polarisations le faisceau peut se translateur suivant 2^n positions (n = nombre d'étages) (figure 46). Une description plus précise de type de déflecteur est fournie dans la référence.

Figure 46



Si le faisceau incident tourne d'un angle θ autour du point I il en est de même des faisceau ordinaires et extraordinaires (figure 47).

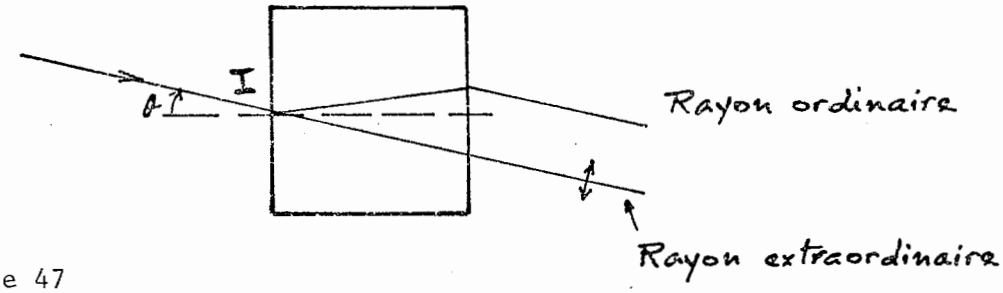


Figure 47

Puisque le système n'affecte pas la longueur d'onde du faisceau incident il peut être placé sur l'onde porteuse dans le plan de l'image D' du premier déflecteur. La marche des faisceaux correspondante est indiquée sur la figure VII.

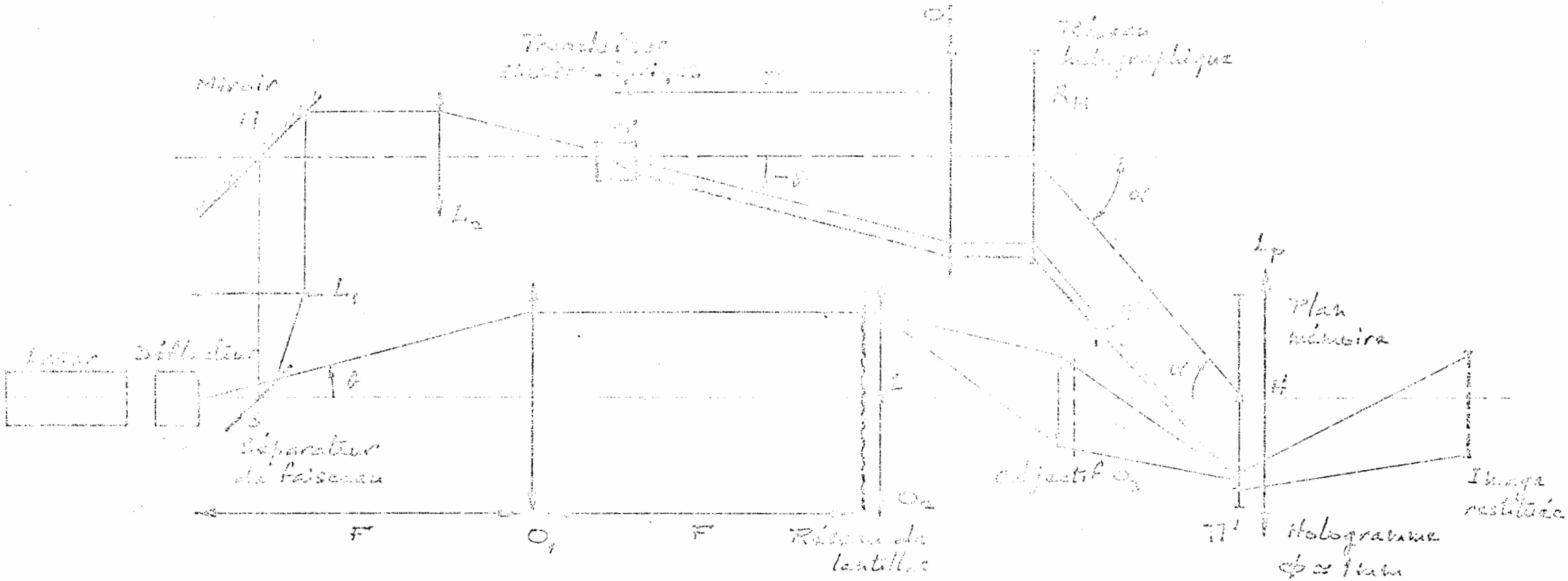

Miroir
Diffuseur
Séparateur de faisceau
Réseau de lentilles
Réseau holographique
Plan mémoire
Objectif
Hologramme
Image restituée

FIGURE VII

VIII - ETUDE PARTICULIERE DES DIFFERENTS COMPOSANTS DE LA MEMOIRE

Dans ce chapitre nous allons étudier de façon particulière différents composants qui entrent dans la réalisation de la mémoire. Nous indiquerons les performances actuelles et nous donnerons les caractéristiques souhaitables pour envisager des capacités élevées.

La nature possible des différents éléments est résumée sur la figure VIII (laser - déflecteur - composeur de pages - matériaux photosensibles - matrice de détection et composants optiques).

VIII.1 - Déflecteur acousto-optique

Le système de déflection utilisé pour l'adressage du plan mémoire est du type acousto-optique. Le principe de fonctionnement est indiqué sur la figure 47.

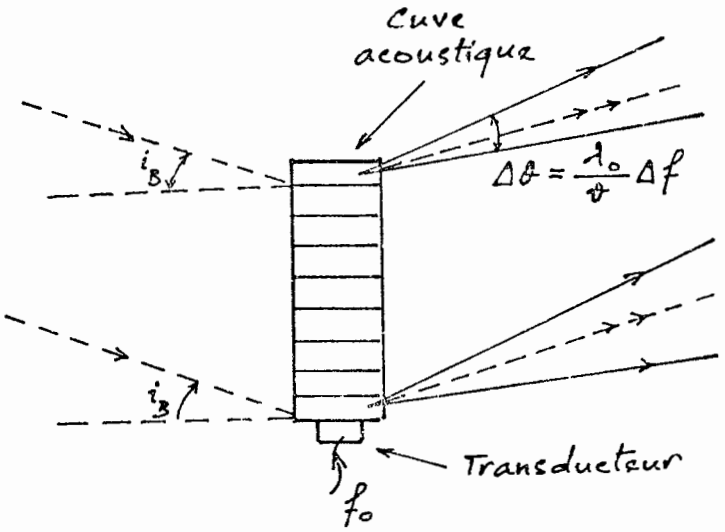


Figure 48

Le signal électrique de fréquence f_o est envoyé sur un transducteur ($LiNbO_3$). Ce matériau piézoélectrique génère une onde ultrasonore dans la cuve à la fréquence f_o. Le réseau acoustique de pas λ_a ainsi crée diffracte la lumière suivant l'angle θ_d tel que :

$$\theta_d = \frac{\lambda_o}{\lambda_a}$$ λ_o = longueur d'onde optique

$$\lambda_a = v \times \frac{1}{f_o}$$ λ_a = longueur d'onde acoustique

$$\theta_d = \frac{\lambda_o}{v} \cdot f_o$$ v = vitesse du son

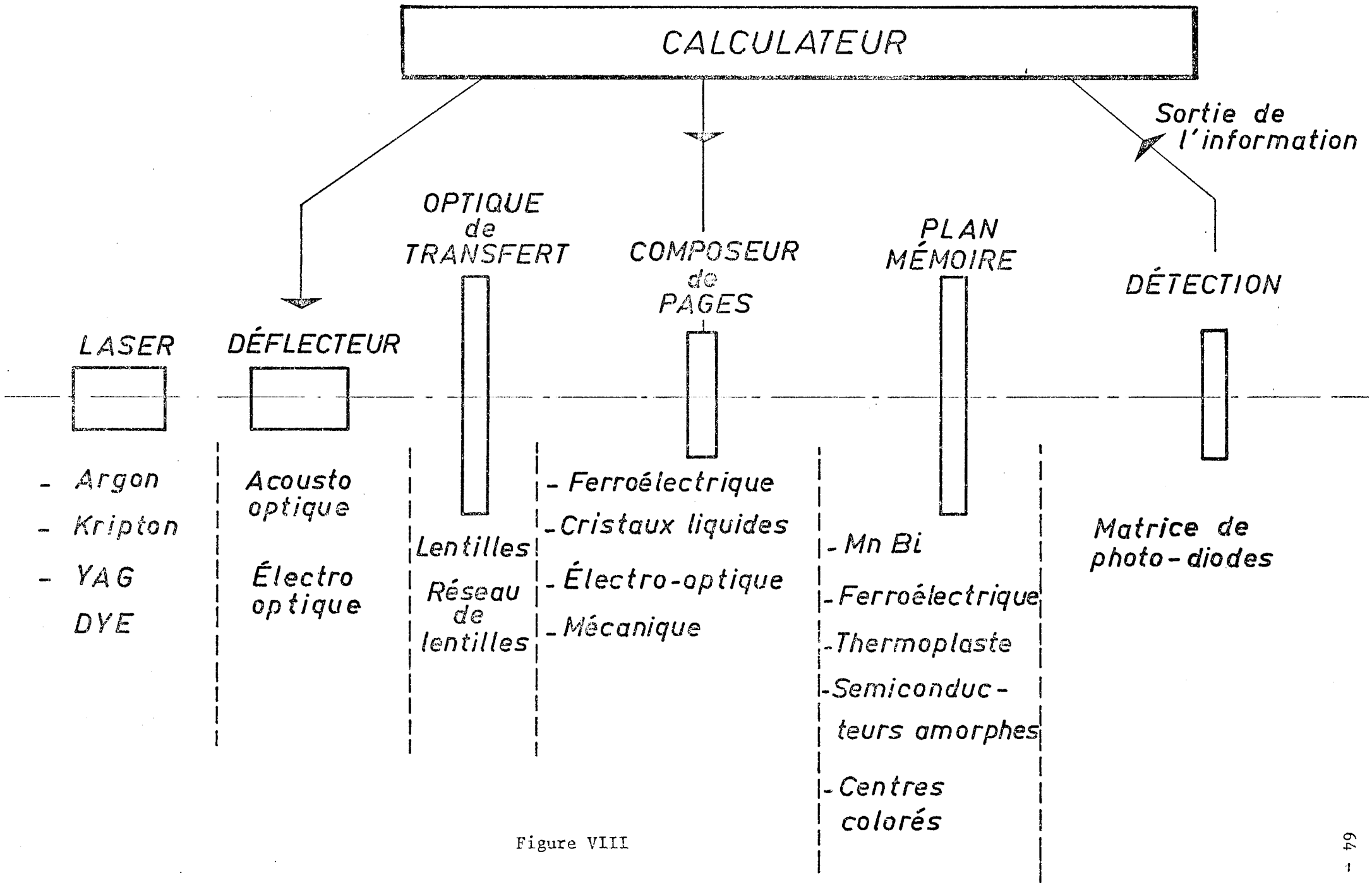

CALCULATEUR
Sortie de l'information
OPTIQUE de TRANSFERT
COMPOSEUR de PAGES
PLAN MÉMOIRE
DÉTECTION
LASER
DÉFLECTEUR
- Argon
- Kripton
- YAG
DYE
Acousto optique
Électro optique
Lentilles
Réseau de lentilles
- Ferroélectrique
- Cristaux liquides
- Électro-optique
- Mécanique
- Mn Bi
- Ferroélectrique
- Thermoplaste
- Semiconducteurs amorphes
- Centres colorés
Matrice de photo-diodes

Figure VIII

Le réseau est utilisé suivant un angle d'incidence égal à l'angle de Bragg correspondant à la fréquence centrale f_o :

$$\sin i_B = \frac{\lambda_o}{n \lambda_a}$$

n = indice de réfraction du matériau

Pour une excursion de fréquence Δf de part et d'autre de la fréquence centrale f_o, la variation angulaire totale $\Delta\theta$ du faisceau à la sortie vaut :

$$\Delta\theta = \frac{\lambda_o}{v} \Delta f$$

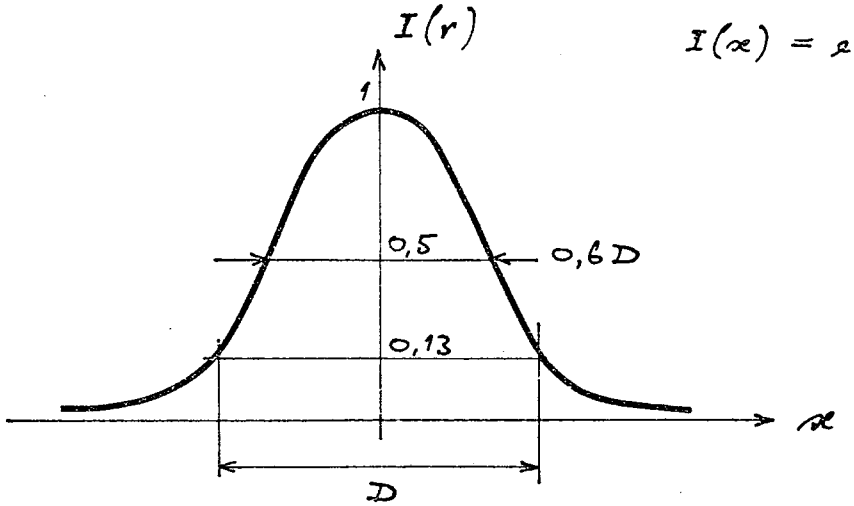
VIII.1.1 - Relations donnant le nombre de points (24)

(Eclairage Gaussien)

La répartition d'intensité dans le faisceau de sortie du laser vaut :

$$I(r) = \exp - \frac{2x^2}{\left(\frac{D^2}{4}\right)}$$

D est le diamètre correspondant à une baisse de l'intensité égale à $1/e^2$ $(1/e^2 \simeq 0,13)$



$$I(x) = \exp - \frac{8x^2}{D^2}$$

Figure 49

La répartition d'intensité diffractée vaut :

$$I(u) = \exp - \frac{\pi^2 D^2 u^2}{2} \qquad \left(u = \frac{\theta}{\lambda_0}\right)$$

Le nombre de points résolus en adoptant le critère en $1/e^2$ vaut : (figure 50).

$$N_D = \frac{\Delta\theta}{\theta_D} \; ; \quad \theta_D = \frac{4\lambda_0}{\pi D}$$

$$N_D = \frac{\lambda_0}{v} \Delta f \times \frac{\pi D}{4\lambda_0}$$

soit

$$\boxed{N_D = \frac{\pi}{4} \Delta f . \tau}$$

Pour l'adressage d'un plan mémoire holographique on doit choisir un critère de séparation plus sévère. Il est nécessaire de considérer la précision de positionnement du spot et on doit s'assurer que l'énergie non utilisée de la tache de diffraction n'éclaire pas les hologrammes voisins de la matrice. Ces restrictions liées au taux de remplissage du plan mémoire font que le nombre de points utilisables est divisé par $1/\varepsilon$:

$$\boxed{\frac{N_D}{\sqrt{M}} = \frac{1}{\varepsilon}} \qquad \left(\sqrt{2} \leqslant \frac{1}{\varepsilon} \leqslant 2\right)$$

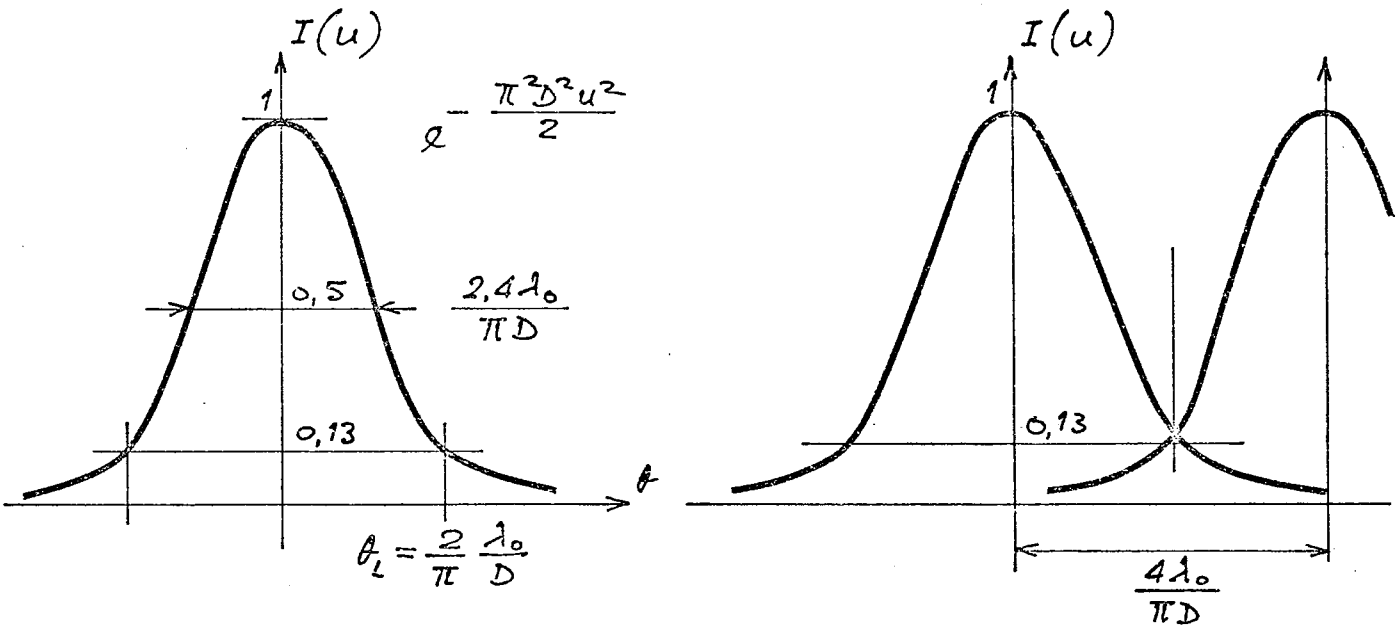


Figure 50

VIII.1.2 - Adaptation du déflecteur aux caractéristiques géomètriques du plan mémoire

Le plan mémoire, ou le réseau de lentilles est éclairé à l'aide du dispositif indiqué sur la figure 51.

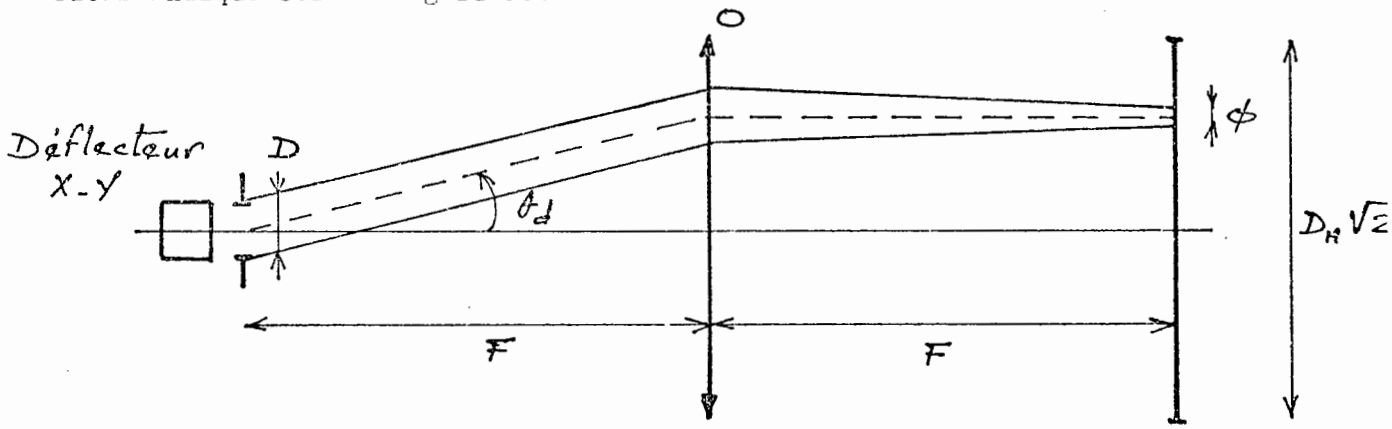


Figure 51

Pour un diamètre de l'hologramme égal à ϕ , et un diamètre D du faisceau à $1/e^2$ à la sortie du déflecteur on a :

$$\frac{F}{D} = \frac{\pi}{4} \frac{\phi}{\lambda_0}$$

Pour une valeur de ϕ donnée seul le rapport $\frac{F}{D}$ est déterminé. La seconde relation fait intervenir le nombre d'ouverture β de l'objectif O.

$$D_H = \frac{F}{\beta} \qquad (2)$$

Des relations (1) et (2) on tire :

$$D = \frac{4}{\pi} \frac{\beta}{\varepsilon} \lambda_0 \sqrt{M}$$

Le déflecteur à associer à un plan mémoire de M hologrammes de surface D_H^2 avec un taux de remplissage égale à $\mathcal{E}^2$ est donc déterminé par les 2 relations suivantes.

- Diamètre du faisceau de sortie :

$$D = \frac{4}{\pi} \frac{\beta}{\mathcal{E}} \lambda_0 \sqrt{M}$$

- Nombre de points :

$$N_D = \frac{\sqrt{M}}{\mathcal{E}}$$

- Distance focale de l'objectif O :

$$F = \beta \times D_H \sqrt{2}$$

VIII.1.3 - Caractéristiques du déflecteur X-Y utilisé

(Déflecteur fourni par le laboratoire de Mr. TORGUET - LCR . TH/CSF).

Cuve acoustique

- Molybdate de Plomb
- Hauteur L de la cuve = 10 mm
- Transducteur : $LiNbO_3$
- Puissance appliquée sur le transducteur 2 W
- Tension de commande $0 \leqslant V \leqslant 7$ V
- Intervalle de fréquence Δf = 170 MHz

. Vitesse de son dans la cuve : v = 3750 m/s

. Indice de réfraction du molybdate de plomb : n = 2,25

L'adaptation du faisceau à la géomètrie du déflecteur est réalisée à l'aide de lentilles cylindriques. Le diamètre du faisceau de sortie est égal à 1 mm.

Nombre de points (critère en $1/\mathcal{E}^2$)

$$N = \frac{\pi}{4} \Delta f \frac{L}{v}$$

$$N = \frac{\pi}{4} \times 170.10^6 \times \frac{4.10^{-3}}{3750}$$

$$\boxed{N \simeq 150}$$

- temps d'accès : $\tau \simeq 1 \mu s$
- rendement $x.y \simeq 20\%$

Type	Nbre points	Temps d'accès aléatoire	Efficacité
Electro-optique	1024 x 1024	0,8 µs	50 %
	128 x 128	0,5 µs	60 %
Acousto-optique	256 x 256	4 µs	50 %
	512 x 512	8 µs	50 %
	1000 x 1000	10 µs	50 %

Les déflecteurs acousto-optiques semblent bien adaptés pour les applications mémoires : ils sont simples d'emploi et le nombre de points est compatible avec les capacités envisagées.

Pour 10^8 bits, on utilisera un déflecteur donnant 200 x 200 points ; pour 10^{10} bits, 650 x 650 points deviennent nécessaires.

VIII.2 - Matériaux photosensibles

L'organisation étudiée est compatible avec l'emploi de matériaux photosensibles reversibles. Il existe un certain nombre de matériaux actuellement en cours d'étude, thermoplastes - ferroélectriques - Manganèse bismuth - verres semi-conducteurs - centres colorés. Les processus physiques mis en jeu pour le fonctionnement reversible de ces différents matériaux sont indiqués dans les références bibliographiques.

Dans le tableau ci-dessous nous résumons les différentes sensibilités, résolutions et efficacités de diffractions qu'il est possible d'obtenir avec les matériaux photosensibles - reversibles ou non, actuellement utilisés ou en cours d'étude.

VIII.2.1 - Matériaux non reversibles

Matériaux	Sensibilité	Rendement	Résolution
Plaque Photo H.R. 649 F.	0,1 mJ/cm^2	Amplitude : 6 % Phase : 34 %	> 4000 t/mm
Gelatine bichromatée	3 mJ/cm^2	95 - 80 %	> 4000 t/mm
Photoresist	100 mJ/cm^2	40 %	> 3000 t/mm
Plexiglass sensibilisé PMMA	2,4 mJ/cm^2	70 %	> 4000 t/mm

VIII.2.2 - Matériaux réversibles

Matériaux	Sensibilité	Rendement	Résolution	Effacement / Réf.
Photochromes	250 mJ/cm^2	3 %	> 2000 t/mm	- lumière - chauffage
Thermoplastes	0,1 mJ/cm^2	10 34 %	1000 t/mm	- chauffage 25 - 26
Magnéto-optiques Mu-Bi	10 - 100 mJ/cm^2	0,01% Faraday 0,05% Kerr	> 1000 t/mm	- chauffage - champ magnétique 27
Titanate Bi + Photoconducteur	1 mJ/cm^2	10^{-2} - 10^{-3}	1000 t/mm	- lumière - champ électrique 28
Verres amorphes Semi-conducteurs	0,1 - 1 J/cm^2	qq %	1000 t/mm	- chauffage 29

Matériaux ferroélectriques épais

(Hologrammes de phase) (λ : 4880 Å)

Matériaux	Sensibilité	Fixation de l'hologramme	Effacement	Réf.
$LiNbO_3$ non dopé	100 J/cm^2	Fixable thermiquement	Optique-thermique	30
$LiNbO_3$ + ray γ	2 J/cm^2	Fixable thermiquement	Optique-thermique	31
$LiNbO_3$ dopé Fer 0,015 %	200 mJ/cm^2	Fixable thermiquement	Optique-thermique	32
$BaTiO_3$ Fe	250 mJ/cm^2	Fixable électriquement	Electrique	33
S B N	1 J/cm^2	Fixable électriquement	Electrique	34 35

VIII.2.2 - Utilisation du stockage tridimensionel dans les ferroélectriques par rotation de l'onde porteuse

On sait qu'un matériau épais permet la superposition des hologrammes par variation de l'angle porteuse objet. Dans ce paragraphe nous rappellerons les lois de sélection angulaire de Bragg et les applications numériques seront effectuées dans le cas particulier d'un matériau ferroélectrique. On calculera également quelles sont les performances requises par le dispositif de déflexion pour obtenir la superposition de 100 pages holographiques suivant les deux directions X-Y dans un matériau d'épaisseur donnée. Si Co est la capacité mémoire sans superposition, la capacité atteinte en utilisant ce mode de stockage devient $C = k^2$ Co.

Pour un matériau d'épaisseur e, d'indice n, θ'_o et θ'_p étant les angles correspondants à θ_o et θ_p à l'intérieur du matériau photosensible (figure 52) la loi de sélection angulaire $\delta\theta'$ dans le milieu photosensible s'écrit : (36-37).

$$\delta\theta' = \frac{\lambda}{ne} \cdot \frac{\cos\theta_0'}{\sin(\theta_0' - \theta_p')}$$

Si on considère l'hologramme central pour lequel l'angle θ_0 est nul, la loi de sélection angulaire $\delta\theta$ à l'extérieur du matériau s'écrit :

$$\delta\theta = n \frac{\cos\theta_p'}{\cos\theta_p} \delta\theta'$$

soit :

$$\delta\theta = n \frac{\lambda}{e} \frac{\cos\theta_p'}{\cos\theta_p \sin\theta_p}$$

$$\delta\theta = \frac{2\lambda}{e} \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta_p}}{\sin 2\theta_p}$$

La translation correspondante Δx du faisceau qu'il est nécessaire de réaliser pour obtenir une rotation de l'onde porteuse égale à $\delta\theta$ après traversée du réseau holographique vaut donc :

$$\delta x = \frac{2\lambda F}{e} \frac{\cos\theta_p \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_p}}{\sin 2\theta_p} \qquad (\theta_p = \alpha)$$

soit :

$$\delta x = \frac{\lambda F}{e} \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta_p}}{\sin\theta_p}$$

<u>Calcul de la déviation angulaire $\Delta\alpha$ nécessaire et nombre de points du second déflecteur</u>

Le schéma de principe du dispositif de translation est rappelé sur la figure ci-dessous (figure 53).

Pour une superposition de k hologrammes suivant une direction la variation angulaire totale $\Delta\alpha$ à la sortie du second déflecteur vaut donc :

$$\Delta\alpha = k \frac{\lambda F}{ef} \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta_p}}{\sin\theta_p}$$

Il est intéressant de caractériser le second déflecteur D_2 par le nombre total N de points qu'il est susceptible de fournir si on utilisait la pupille totale h du déflecteur.

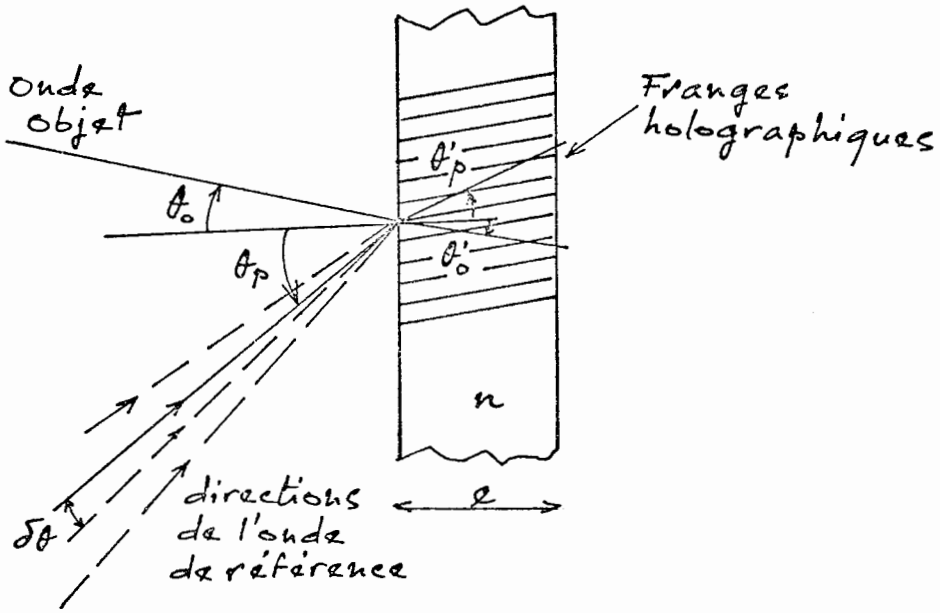


Figure 52

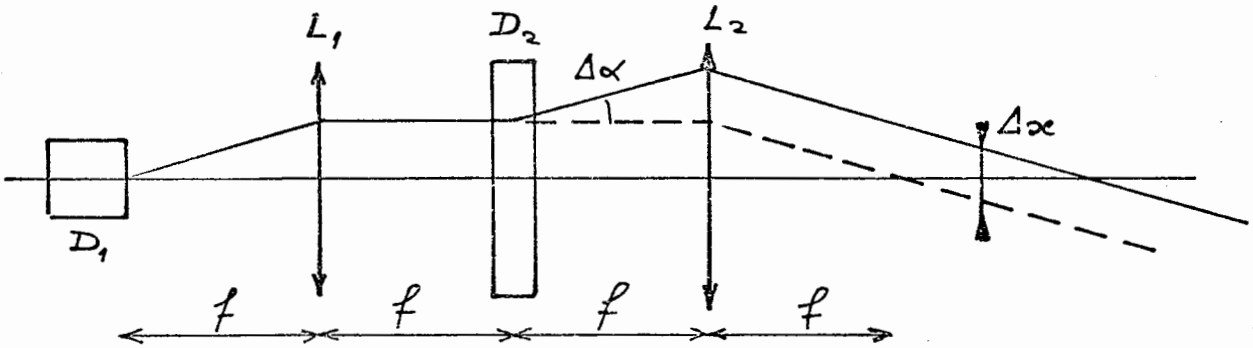


Figure 53

Pour une bande de fréquence de largeur Δf , le nombre de points N défini par le produit N = $\Delta f . \tau$ s'écrit :

$$N = \Delta\alpha . \frac{h}{\lambda} \qquad \text{(h = hauteur de la cuve)}$$

Le système optique étant tel que h = H x $\frac{f}{F}$ le nombre de points du déflecteur D_2 vaut donc :

$$N = k \frac{H}{e} . \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta_p}}{\sin\theta_p}$$

La dimension H du plan mémoire est reliée à la capacité Co et à la densité de stockage Do de la mémoire sans superposition d'hologrammes par la relation :

$$H = \sqrt{\frac{C_o}{D_o}}$$

$$N = \frac{k}{e} \sqrt{\frac{C_o}{D_o}} . \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta_p}}{\sin\theta_p}$$

Application numérique

- e = 10 mm ; n = 2,3 ($LiNbO_3$)

θ_p = 45°

C_o = 10^9

D_o = 2 x 10^6 bits/cm^2

k = 10

$$N = 10 \sqrt{\frac{10^9}{2 10^6}} \sqrt{2,3^2 . 0,5} . \sqrt{2}$$

$$\boxed{N = 700}$$

Capacité : C = 10^2 Co

C = 10^{11} bits

Pour une telle épaisseur du matériau une capacité totale de 10^{11} bits peut donc être atteinte à l'aide de deux déflecteurs acoustiques de 700 points.

Cette épaisseur est compatible avec les échantillons de Niobate de Lithium dont on peut disposer actuellement.

Il faut noter cependant que pour une telle épaisseur de matériau, la coïncidence des deux faisceaux objet et référence est difficile à obtenir dans tout le volume. Une meilleure interaction peut être obtenue en augmentant le diamètre du faisceau référence et en diminuant l'angle porteuse-objet.

VIII.2.4 - Conclusions relatives aux matériaux photosensibles

Pour la réalisation d'une mémoire morte on dispose à l'heure actuelle de matériaux photosensibles argentiques ayant des sensibilités et des efficacités de diffraction acceptables. Par contre le problème du matériau photosensible reversible utilisable dans un système de mémoire holographique inscriptible et effaçable n'est pas encore résolu. Si le tableau correspondant au paragraphe VII.2.2 nous montre qu'il existe actuellement une grande variété de matériaux reversibles en cours d'étude, aucun d'entre eux ne possède tous les critères nécessaires mentionnés ci-dessous pour l'application envisagée :

- sensibilité $\simeq$ 10 mJ/cm^2
- résolution $\simeq$ 1000 t/mm
- efficacité de diffraction $\geqslant$ 1 %
- inscriptible et effaçable sans fatigue
- possibilité d'un cycle Inscription Effacement très court (100 µs par exemple)
- matériau épais utilisable pour la superposition des hologrammes (épaisseur de plusieurs mm)

Parmi tous les matériaux mentionnés le photothermoplaste est à un stade de développement assez avancé pour pouvoir être utilisé dans un système de mémoire. La sensibilité et le rendement de diffraction sont convenables mais les caractéristiques dynamiques ne sont pas atteintes. Le nombre de cycles Inscription-Effacement est limité, et le temps de cycle correspondant est de l'ordre de quelques secondes.

Le matériau magnéto-optique MnBi constitue un cas particulier. En effet, la sensibilité est acceptable, et le nombre de cycle Inscription-Effacement est extrêmement grand car il correspond au basculement de l'aimantation du matériau.

Pour ce matériau les limitations viennent de la puissance crête nécessaire à l'inscription car le temps d'exposition ($\simeq$ 20 ns) est imposé par des considérations thermodynamiques.

Les matériaux ferroélectriques (cristaux ou céramiques) apparaissent actuellement les plus prometteurs. Ils permettent l'enregistrement d'hologrammes de phase dont les variations d'indice sont dues au champ de charges d'espace crée dans le matériau par migration de photoélectrons. On dispose d'échantillons dont les épaisseurs sont de plusieurs millimètres : ils sont donc parfaitement adaptés au stockage holographique tridimensionnel par rotation de l'onde de référence. Les études poursuivies sur ces matériaux doivent permettre de mieux comprendre les phénomènes de photoinduction mis en jeu pour l'enregistrement et l'effacement optique ce qui permettra par dopage convenable d'augmenter la photosensibilité de ces cristaux.

VIII.3 - Composants optiques

Les composants optiques qui entrent dans l'organisation présentée sont du type lentilles - réseau de lentilles et réseau holographique.

VIII.3.1 - Objectifs d'adressage du plan mémoire

Dans l'organisation présentée, les composants O_1, O_2 et O'_1 ont des diamètres tels qu'ils doivent couvrir le plan mémoire.

Afin d'utiliser au mieux la géomètrie circulaire des composants optiques il est évident que les hologrammes devraient être disposés comme il est indiqué sur la figure 54. Pour une capacité C_0 et une densité de stockage $D_{,0}$ le diamètre ϕ des plus grands composants est tel que :

$$\frac{\pi \phi^2}{4} \times D_0 = C_0$$

soit

$$\phi = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \times \sqrt{\frac{C_0}{D_0}}$$

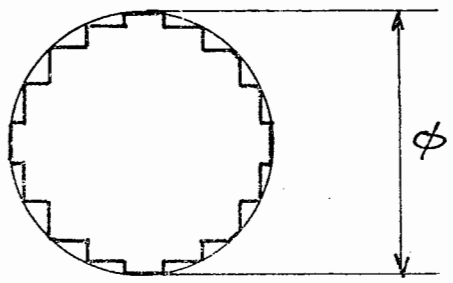


Figure 54

Sur la figure 55 on a représenté la courbe de variation de ϕ en fonction de la capacité pour une valeur particulière de la densité de stockage égale à 10^6 bits/cm^2 et 2×10^6 bits/cm^2.

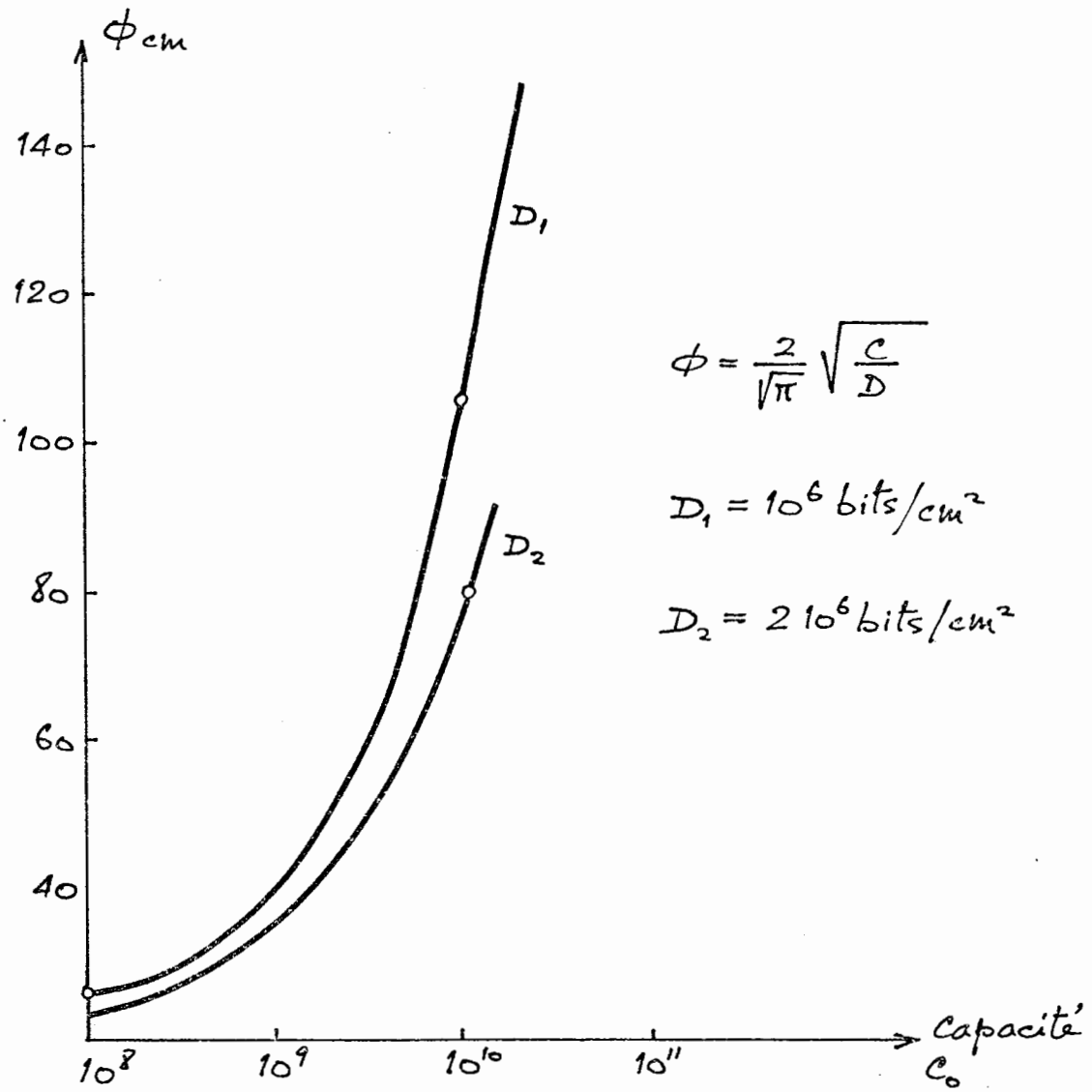


Figure 55

Cette courbe montre que si on se limite à des diamètres raisonnables des composants optiques ($\emptyset \leq 30$ cm) la capacité Co de la mémoire sans superposition d'hologrammes est de l'ordre de 10^9 bits.

VIII.3.2 - Réseau de lentilles

Dans l'organisation présentée les lentilles constituant la matrice sont toutes identiques. La réalisation d'un réseau complet de 10^4 ou 10^5 lentilles semblant difficile par les méthodes classiques nous nous sommes intéressés à la réalisation de réseaux de lentilles holographiques synthétiques obtenus par photo-répétition d'un hologramme synthétique de bon rendement.

Les différentes techniques utilisées pour l'obtention d'un réseau de 32 x 32 lentilles, ou d'une lentille unique de haut rendement sont exposés dans les paragraphes suivants.

VIII.3.3 - Fabrication de lentilles holographique synthétiques

Etude théorique

Une lentille est caractérisée par une fonction de phase quadratique φ, telle que

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\rho^2}{2F}$$

où F est la distance focale et ρ le rayon polaire.

Par conséquent, pour transformer une onde plane incidente en une onde sphérique il suffit de moduler l'épaisseur d'un matériau selon cette loi et de manière à ce que le maximum de relief corresponde à un retard de phase de 2π radians (38-39).

Le maximum de relief d_{max} est alors donné par

$$d_{max} = \frac{\lambda}{n-1}$$

où n est l'indice de réfraction du matériau.

En chaque point le microrelief d est tel que

$$d = \frac{\varphi}{2\pi} (\mathrm{mod}\ 2\pi)\, d_{max}$$

Le profil d'un tel microrelief est montré sur la figure 56. La lentille est constituée de zones sphériques : le rayon ρ_K de la Kième zone étant tel que

$$(K\lambda - F)^2 + \rho_K^2 = F^2$$

soit

$$\rho_K = \sqrt{2K\lambda F - K^2\lambda^2}$$

Quand l'ouverture de la lentille est faible ($K^2 \lambda^2 \ll 2K \lambda F$), l'expression de ρ_K est celles des zones de Fresnel :

$$\rho_K \# \sqrt{2K\lambda F}$$

soit encore

$$\rho_K = \rho_1 \sqrt{K}$$

où ρ_1 est le rayon de la première zone.

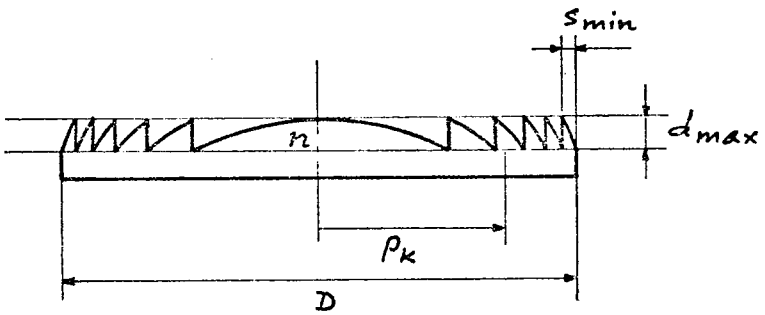


Figure 56

La distance entre deux zones consécutives est

$$s_K = \rho_{K+1} - \rho_K$$

Pour une lentille de diamètre D, la distance entre les deux dernières zones (figure 56) est

$$s_{min} = \frac{2\lambda F}{D}$$

Le tableau indique quelques valeurs de S_{min} en fonction de l'ouverture de la lentille pour λ = 0,9 µm

F/D	1	2	3	5	6	10
S_{min} (µm)	1,8	3,6	5,4	9	10,8	18

On voit que la précision avec laquelle on saura faire les plus petites zones détermine l'ouverture de la lentille.

La même limitation a lieu avec le rapport entre le nombre total de zones K et le diamètre D de la lentille.

Pour un diamètre D, on a

$$\frac{D^2}{4}\,\frac{1}{2F} = K\lambda,$$

soit

$$\frac{K}{D} = \frac{1}{8\lambda}\left(\frac{D}{F}\right)$$

Donc, pour avoir des lentilles de petit diamètre mais de grande ouverture, il est nécessaire de réaliser des zones de quelques microns de largeur et de moins de 1 µm d'épaisseur.

De telles dimensions font appel à des technologies de gravure d'une très grande précision.

Approximation du profil par échantillonnage

La réalisation du profil désiré (43) (44) peut être approchée par une quantification de la phase φ selon N niveaux d'amplitude $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{N}$ (figure 57).

Ce profil génère alors des foyers secondaires dont les positions le long de l'axe par rapport au centre de la lentille sont données par

$$F_N = \frac{F}{N(m-1)+1}$$

où m est le rang du foyer.

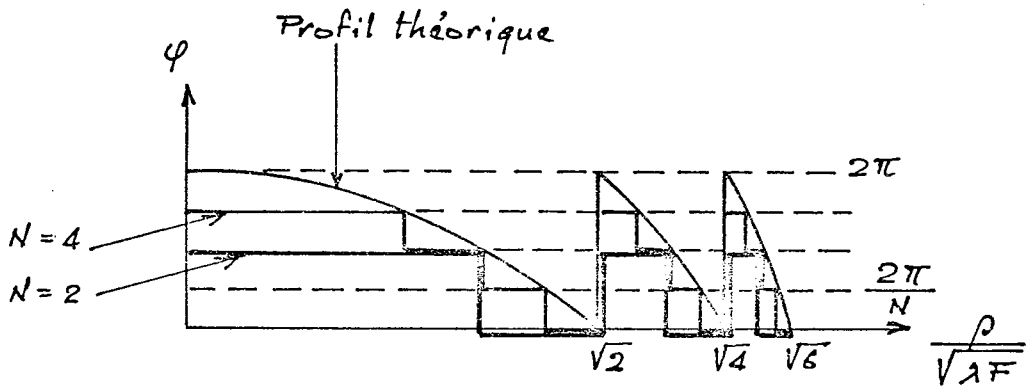


Figure 57

Le rendement de diffraction R sur le foyer de rang m est donné par

$$R = \left[\frac{\sin \pi \left(m - 1 + \frac{1}{N} \right)}{\pi \left(m - 1 + \frac{1}{N} \right)} \right]^2$$

Sur le foyer principal (m = 1) ce rendement devient

$$R_N = \left(\frac{\sin \frac{\pi}{N}}{\frac{\pi}{N}} \right)^2$$

Quelques valeurs du rendement de diffraction sur le foyer principal en fonction du nombre de niveaux sont données ci-dessous :

Nombre de niveaux	2	3	4	5	10
Rendement (%)	40	68	81	87	97

VIII.3.4 - Résultats expérimentaux

Réalisation d'une lentille à quatre niveaux de phase

Des lentilles avec plusieurs niveaux de phase ont été réalisées. La technologie utilisée est semblable à certaines technologies de fabrication des circuits intégrés.

La méthode retenue consiste notamment en masquages et gravures successifs d'une plaque de SiO_2 d'épaisseur adéquate.

Les principales étapes de la fabrication peuvent se résumer comme suit :

- oxydation thermique d'une plaquette de silicium ; l'épaisseur de silice formée peut être contrôlée avec une précision de quelques centaines d'angströms,
- masquage et gravure chimique de la couche de silice.

La couche de silice est recouverte de photoresist, insolée à travers un masque à transparence binaire et développée. Les parties non masquées de la silice sont alors gravées chimiquement, la profondeur étant déterminée par le temps de gravure.

Trois opérations successives faisant appel à trois masques convenablement calculés ont permis d'obtenir le profil échantillonné désiré (figure 58) la matrice de silice utilisée comme moule, permet d'obtenir une copie en polystyrène.

Une lentille ayant les caractéristiques suivantes a été réalisée :

- diamètre de la lentille : 1 cm,
- distance focale : 30 cm,
- ouverture : 30.

Le rendement optique de la copie, mesuré à $\lambda = 0,9$ µm est de 63%.

Le microrelief du moule est donné sur la figure IX. La figure X montre le moule de silice ainsi que la lentille après copie du microrelief. Une image d'un plan données binaires de 10^4 bits est présentée sur la figure XI.

Réalisation d'un réseau de 32 x 32 lentilles à deux niveaux de phase

Un masque à transparence binaire, correspondant à une lentille à deux niveaux de phase a été calculé, fabriqué sur support pelliculable, réduit et "photorépété" afin d'obtenir un réseau de 32 x 32 lentilles.

Une couche de photorésist, exposée à travers ce masque et développée, reproduit le réseau de lentilles.

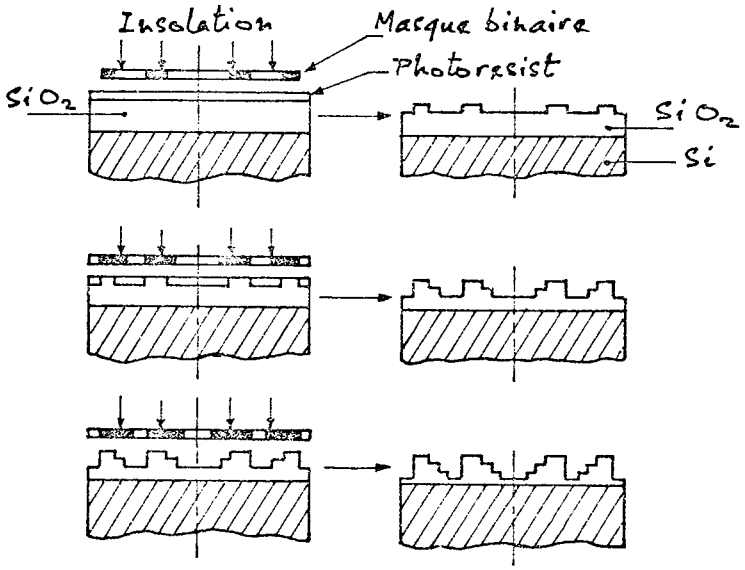


Figure 58

Les caractéristiques de chaque lentille sont les suivantes :

- diamètre de la lentille : 2 mm
- distance locale : 13 mm,
- ouverture : 6,5,,
- rendement optique mesuré : 35%
- hauteur du relief : 0,76 µm.

Un réseau de 32 x 32 lentilles est montré sur la figure XII

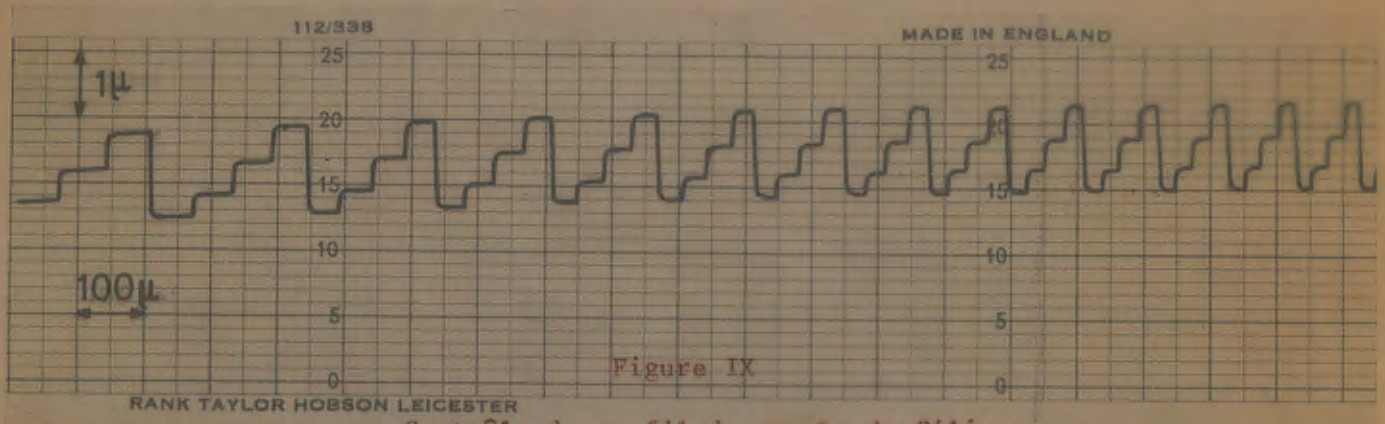
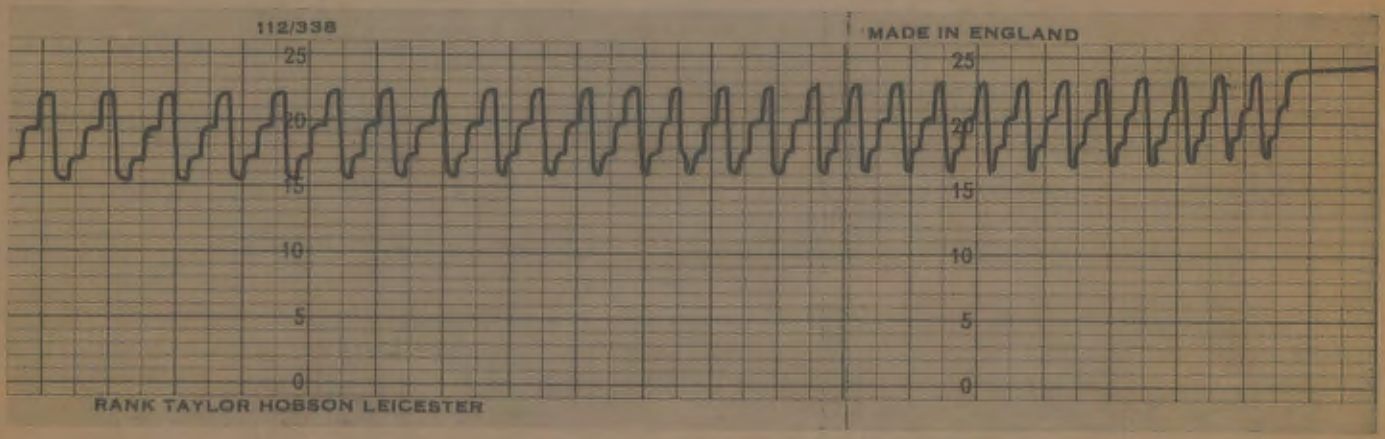


Figure IX

Contrôle du profil du moule de Silice

Lentille échantillonnée 4 niveaux de phase



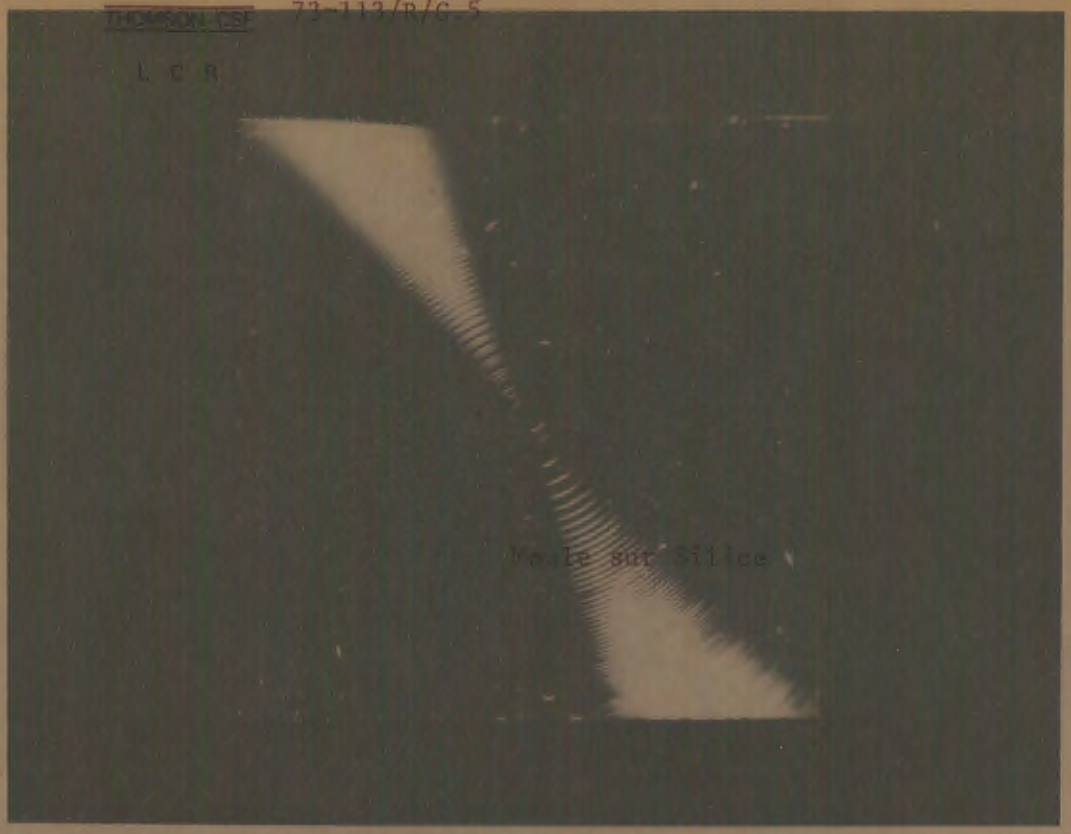


Figure X

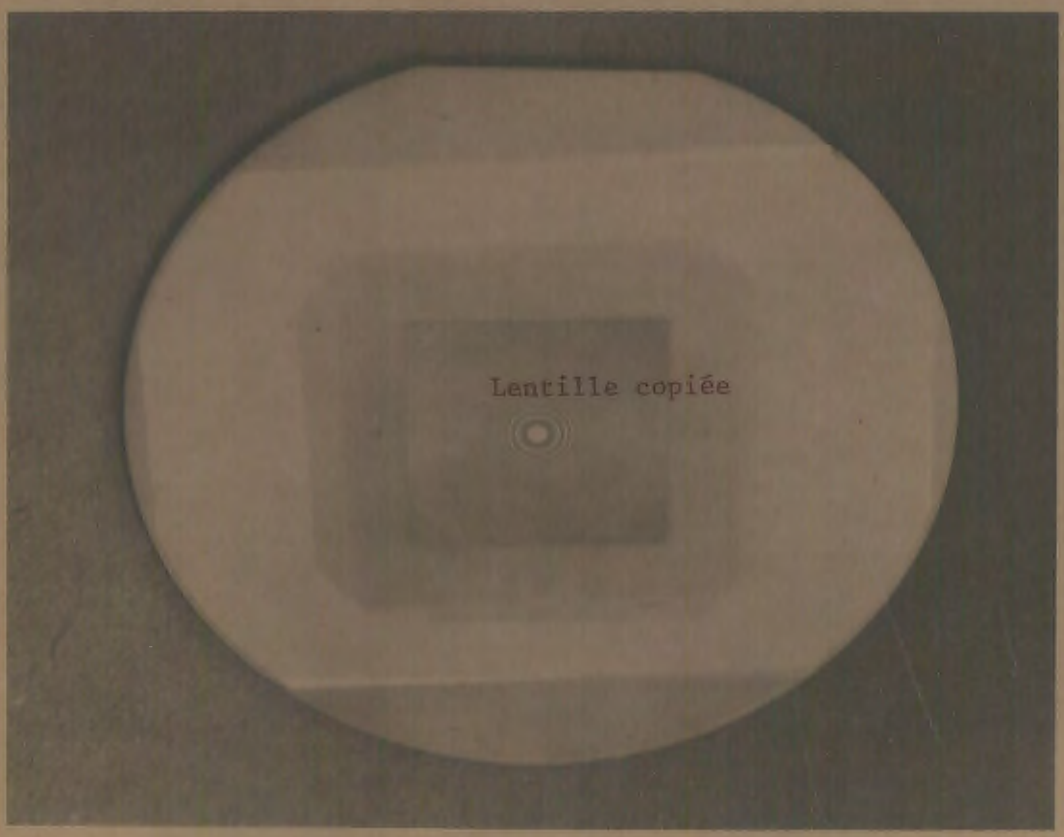


Image d'un plan de données
à l'aide d'une lentille à
4 niveaux de phase -

a - Lumière monochromatique

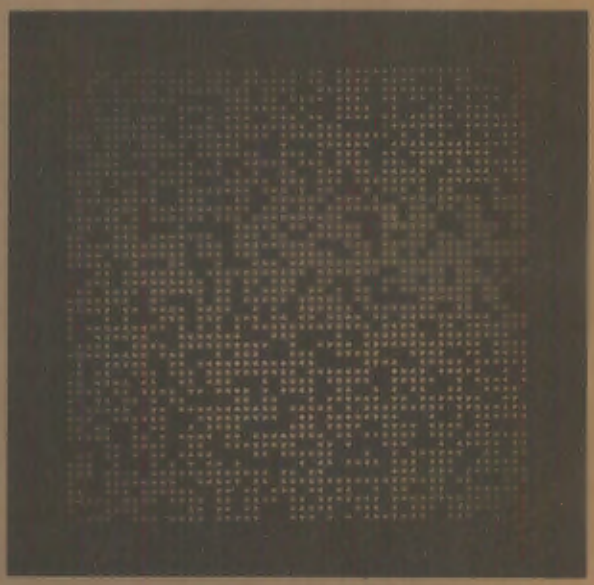


Figure XI

Image d'un plan de données à l'aide d'une lentille
holographique à 4 niveaux de phase

b - lumière blanche

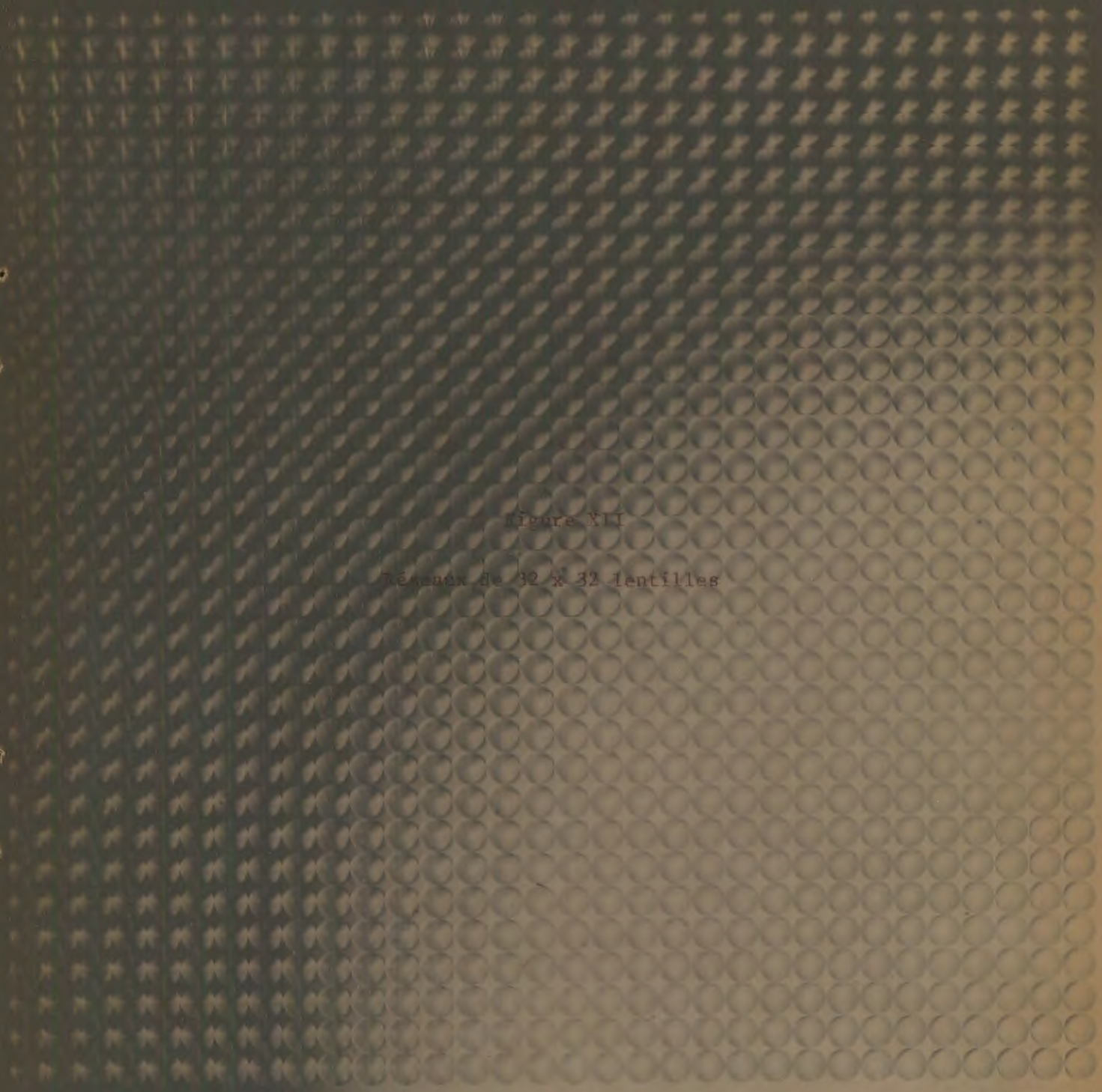


Figure XII

Réseaux de 32 x 32 lentilles

VIII.4 - Composeur de pages

VIII.4.1 - Principe de fonctionnement

Le composeur de pages est un des éléments essentiel d'une mémoire inscriptible et effaçable. Dans ce cas il est en effet indispensable d'introduire les données en temps réel dans le plan objet. Il s'agit donc de réaliser une modulation spatiale de l'onde objet, commandable en X-Y à l'aide des signaux électriques correspondants aux bits de la page. Le problème se ramène donc à modifier la transparence en amplitude ou en phase, de certains matériaux sous l'action d'un champ électrique.

Le chargement de l'imageur à accès X-Y se fait donc par sélection des lignes, et entrée en parallèle sur les colonnes des bits correspondants (figure 59).

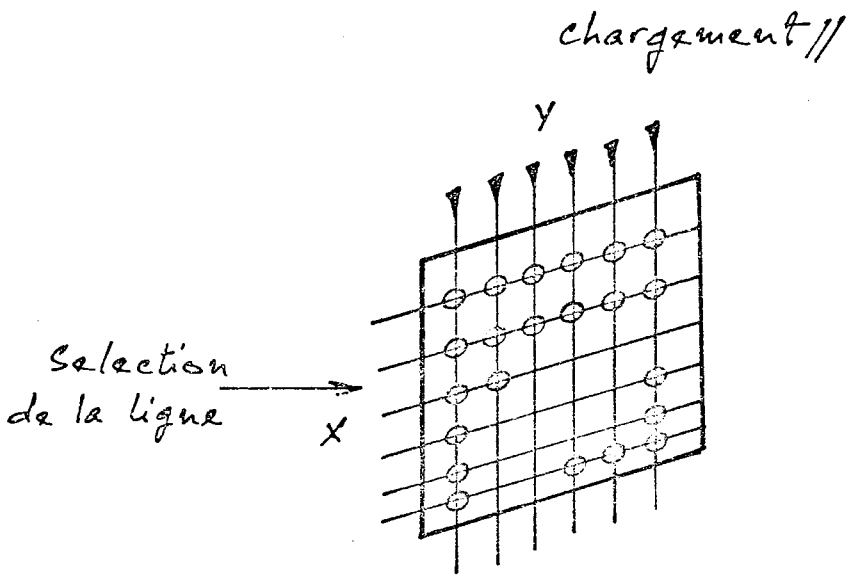


Figure 59

Un tel accès X-Y nécessite donc uniquement 2 N - fils de commande. Par comparaison un accès individuel à chaque point obligerait à sortir N^2 fils ($N \simeq 10^3$ à 10^4).

Un tel accès X-Y ne peut être obtenu que si le matériau possède un seuil correspondant à une mise en mémoire du point. Les tensions de commande ligne et

colonne sont telles que leur somme est supérieure à la tension seuil V_s, chacune d'entre elle restant inférieure à V_s.

Dans les paragraphes ci-dessous nous décrirons de façon plus précise le principe de fonctionnement du composeur de pages ferroélectrique PLZT et électrostatique à membrane.

VIII.4.2 - Imageur ferroélectrique PLZT

Principe

Le composeur étudié actuellement utilise les propriétés de biréfringence contrôlée d'une céramique PLZT. (43, 44, 45).

Le fonctionnement repose sur le basculement de l'ellipsoïde des indices entre deux positions perpendiculaires, qui correspondent à deux états stables de polarisations électriques.

Détail de fonctionnement

La céramique recouverte d'électrodes est collée sur une plaque de plexiglass. En tordant le plexiglass, on impose à la céramique une contrainte qui a pour effet de bloquer la polarisation dans le plan de la céramique : état "0".

Par application d'une tension électrique on peut faire basculer la polarisation perpendiculairement à la céramique : état "1". Les deux états sont stables et on peut passer de l'un à l'autre par application d'impulsions de tensions.

Aux deux états de polarisation "0" et "1" correspondent deux états de biréfringence. On ajuste l'épaisseur de la céramique pour que l'intensité transmise entre polariseurs croisés varie de 0 à 100 %.

Le montage est le suivant (figure 60) :

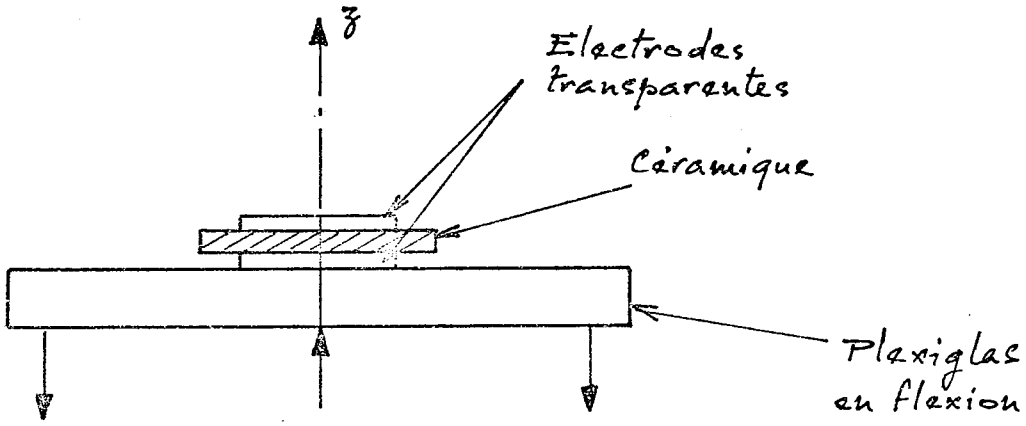


Figure 60

Les électrodes sont disposées de part et d'autre pour former une matrice de lignes et de colonnes (figure 61) :

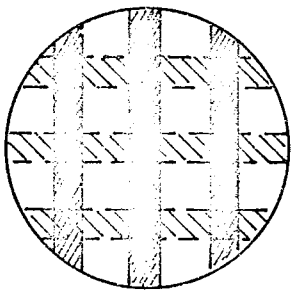


Figure 61

Cycles de fonctionnement

Il n'est pas possible de distinguer optiquement deux états de polarisations électriques antiparallèles.

Le fonctionnement des céramiques repose donc sur le basculement de l'ellipsoïde des indices entre deux positions perpendiculaires (figure 62). Si l'on trace le cycle de la polarisation rémanente P_r selon l'axe vertical Oz et le champ Ez, on décrit donc un cycle partiel (trait plein) et non un cycle complet (trait pointillé).

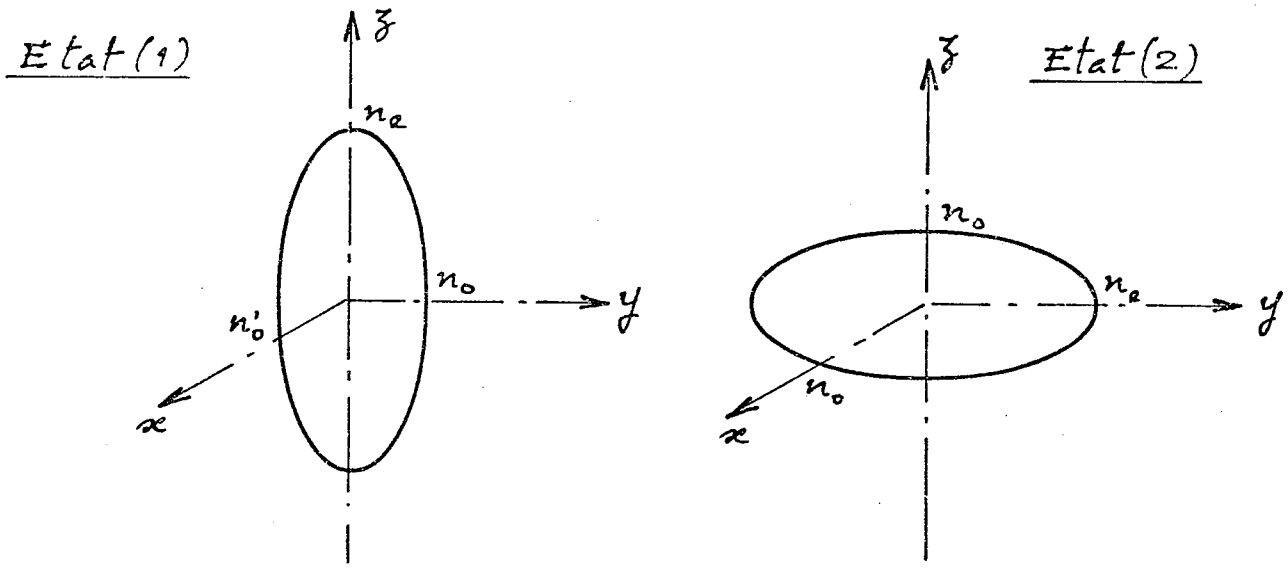


Figure 62

Ellipsoïdes des indices

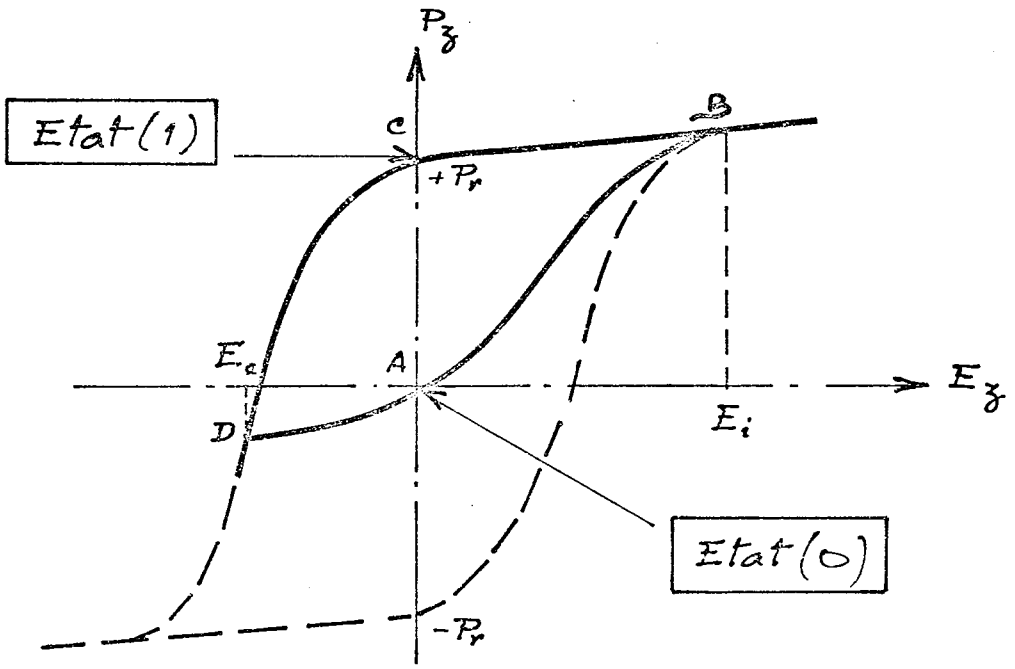


Figure 63

$$P_z = f(E_z)$$

Cycle électrique

Pz = polarisation électrique vertical

Ez = champ électrique vertical

Inscription

- application d'une tension E_i : le point figuratif passe de A en B
- retour de la tension à 0 : le point figuratif passe de B en C.

Effacement

- application d'une tension $-E_e$: le point figuratif passe de C en D
- retour de la tension à 0 : le point figuratif passe de D en A.

Si le principe de fonctionnement correspond à celui décrit sur la figure 63 il se pose en pratique des problèmes de demi-accès lorsque l'on envisage un adressage X-Y. Ceci nécessite la recherche de nouveaux cycles de fonctionnement relativement insensibles aux demi-tensions d'adressage (47).

VIII.4.3 - Imageur à déflexion de membrane

Ce type d'imageur est basé sur la déformation mécanique d'une membrane souple tendue sur un support sous l'action d'un champ électrique (figure 64).

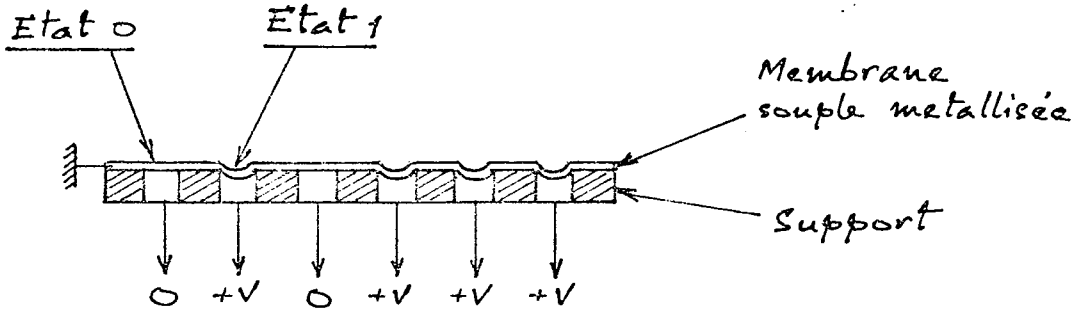


Figure 64

Chaque cellule élémentaire peut être commandée par la tension 0- ou V produisant une déformation locale de la membrane. Si le système est éclairé par réflexion, chaque membrane déformée se comporte comme un petit miroir sphérique qui diffracte la lumière dans un angle solide beaucoup plus grand que celui correspondant à l'hologramme (figure 65).

Un système d'enregistrement possible du plan mémoire avec un tel imageur travaillant par réflexion est indiqué sur la figure 66.

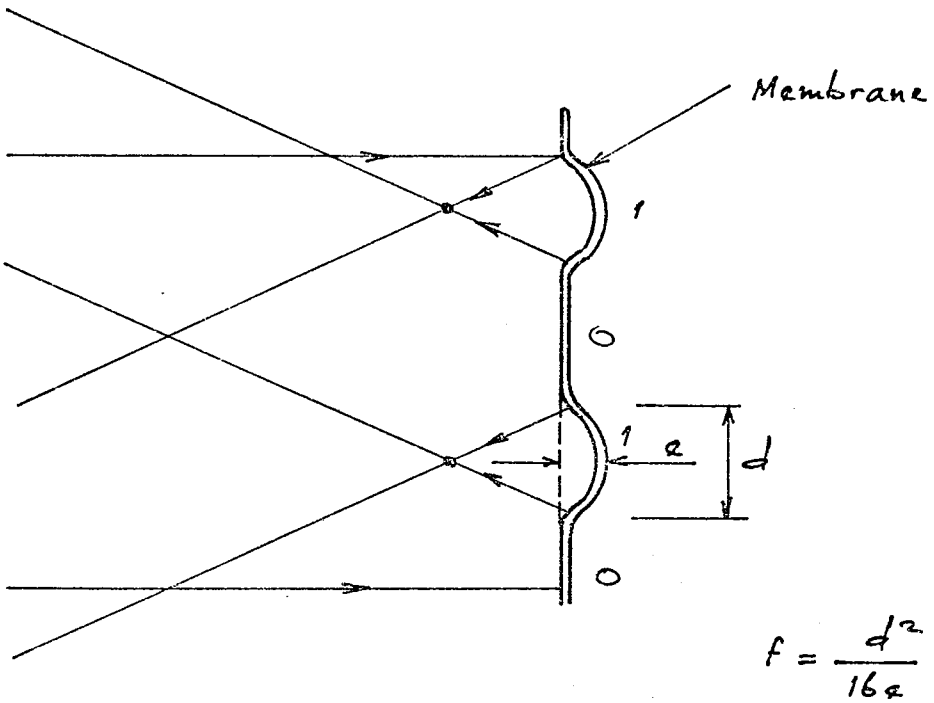


Figure 65

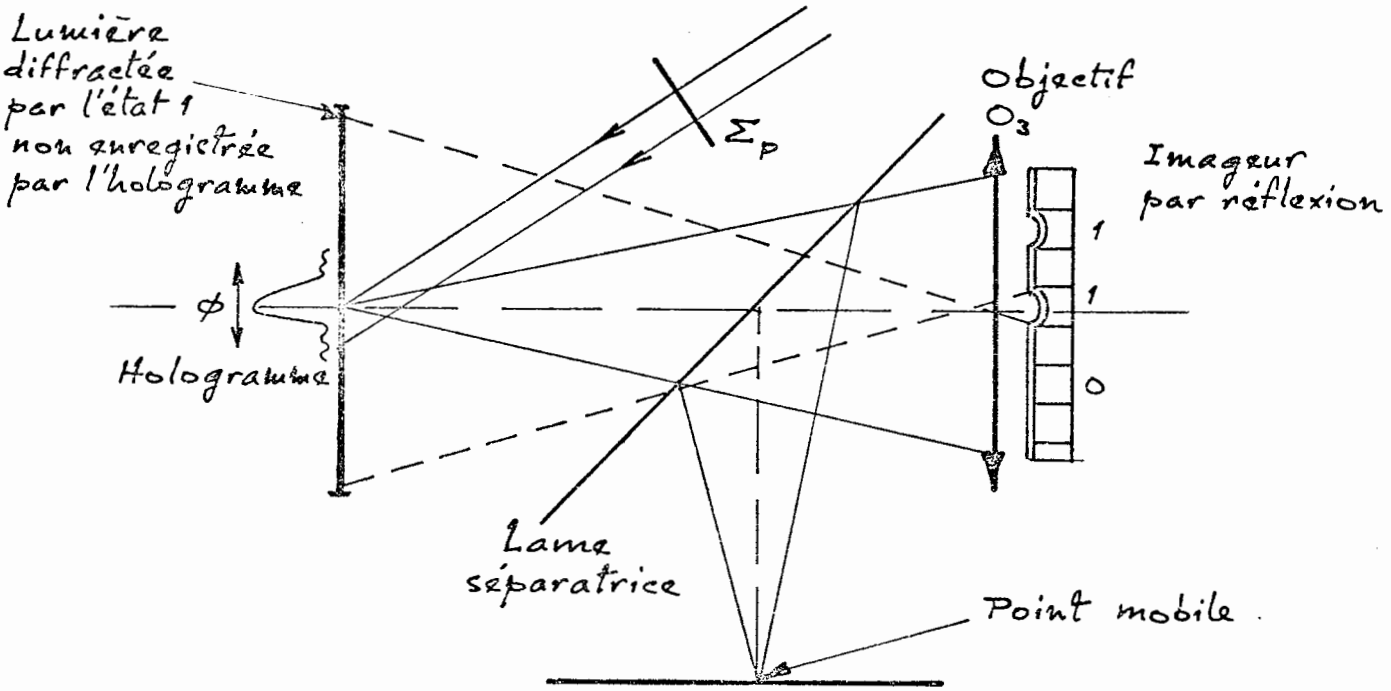


Figure 66

Les seules données que l'on ait sur de tels imageurs proviennent de références Perkin-Elmer, qui avait étudié un tel système suivant une dimension pour l'introduction des données dans un corrélateur optique. Les chiffres avancés sont indiqués dans le tableau ci-dessous. (46).

- Diamètre du bit : 50 μ
- Pas : 100 μ
- Temps de déformation : 1 μs
- Nombre de cycles : 10^{12}

Outre la technologie d'un tel imageur qui semble délicate (choix de la membrane, uniformité de la tension mécanique), l'inconvénient principal est l'absence de mémoire du point.

En effet, la membrane revient à son état d'équilibre dès que la tension V est coupée. Afin d'obtenir un adressage X-Y il est donc nécessaire d'associer une mémoire à chaque point (matrice de bascules). De tels éléments sont réalisables par les techniques d'intégration mais ils compliquent le système d'adressage.

CONCLUSION

Le présent travail concerne l'étude de l'organisation d'une mémoire holographique à accès aléatoire. Ce type de mémoire est composé d'une matrice de M pages holographiques, chacune d'elle restituant N bits d'information sur une matrice de photo-détecteurs. L'adressage est obtenu par déflexion d'un faisceau laser, le temps d'accès aléatoire à chaque page dépend de la rapidité de la déflexion du faisceau laser de l'ordre de quelques μs).

L'organisation de la mémoire étant fonction du mode d'enregistrement des pages holographiques on a expérimenté une méthode d'enregistrement permettant d'obtenir une bonne qualité d'image (holographie de Fourier) pour un diamètre faible de l'hologramme ($\phi \simeq 1$ mm).

L'organisation adoptée est celle d'une mémoire inscriptible et effaçable tridimensionnelle, les fonctions d'enregistrement et de lecture du plan mémoire étant obtenues à l'aide d'un déflecteur acousto-optique sans aucun déplacement mécanique des composants. Le système optique est en cours d'expérimentation pour l'enregistrement de réseaux d'hologrammes. Le calcul théorique de la capacité d'une telle mémoire à accès aléatoire, nous a montré que pour une longueur d'onde $\lambda = 0,5$ μm, la densité de stockage atteinte est de l'ordre de 2×10^6 bits/cm^2. Cette densité tient compte du taux de remplissage limité du plan mémoire qui en pratique sera compris entre 1/2 et 1/4 et de la perte de résolution dans l'image lorsque les angles de diffraction des hologrammes deviennent importants. Cette perte de résolution est due à l'allure elliptique des bits d'information dans le plan de l'image.

L'ellipticité tolérable correspond à des angles de diffraction de l'ordre de 38°. Nous avons également montré que l'on pouvait s'affranchir de cette perte de résolution dans l'image en fonction de l'angle de diffraction si le plan mémoire se compose de sous-réseaux élémentaires de dimensions réduites convenablement orientés par rapport à une sphère.

Afin d'obtenir une capacité élevée (supérieure à 10^{10} bits) nous avons défini une organisation permettant de superposer plusieurs hologrammes en chaque point du plan mémoire. Cette technique de superposition permet de conserver un accès aléatoire rapide à chaque page d'informations sans augmenter le nombre des composants tels que plan mémoire et matrice de détection.

Dans ce cas, la capacité s'écrit sous la forme du produit C = M x N x P, M étant le nombre de positions d'adressage du déflecteur, N le nombre de bits par pages et P le nombre d'hologrammes superposés.

Afin de bénéficier des effets de sélection angulaire de Bragg, cette technique de superposition nécessite un matériau de stockage tridimensionnel dont l'épaisseur est grande vis à vis du pas des franges d'interférences. A l'aide d'une telle solution, on peut envisager des capacités mémoires de 10^{11}-10^{12} bits qui seront obtenues par superposition de 10^2 pages par rotation du faisceau référence en chaque point du plan mémoire. Un second dispositif de déflexion acousto-optique permet d'obtenir en chaque point du plan mémoire un accès aléatoire rapide à un angle porteuse-objet quelconque. Les performances nécessaires pour ce deuxième déflecteur ont été calculées en tenant compte de l'épaisseur du matériau photosensible et du nombre d'hologrammes superposés. Nous avons également effectué une étude plus précise de certains composants entrant dans la conception d'une mémoire holographique inscriptible et effaçable : déflecteurs, composants optiques, matériaux photosensibles réversibles. Les progrès réalisés récemment dans le domaine des déflecteurs acousto-optiques font que ce composant possède actuellemen des performances élevées. Le nombre de points, le temps d'accès est la précision d'adressage obtenus sont compatibles avec leur utilisation dans un système de mémoire. Le plan mémoire réversible en cours d'expérimentation se compose d'un réseau de cristaux de niobate de lithium permettant l'enregistrement, l'effacement et la superposition des blocs d'informations. Ces matériaux ferroélectriques constituent actuellement la meilleure approche au problème du matériau de stockage. L'étude des méthodes de fabrication des réseaux de lentilles a fait l'objet d'une attention particulière. Des techniques de photolithographie ont été utilisées pour la réalisation de réseaux de grandes dimensions (32 x 32) et de bon rendement de diffraction.

Les études relatives à la technologie et à l'organisation des dispositifs de stockage optique permettent donc la recherche et le développement de nouveaux composants électro-optiques performants et de nouveaux matériaux photosensibles réversibles. Les systèmes en cours d'expérimentation consistent en des mémoires partiellement remplies permettant de prouver la faisabilité et la validité de ce type de mémoire. En fonction de leurs performances potentielles : capacité, temps d'accès, débit, de tels dispositifs de stockage peuvent donc remettre en question la hiérachie classique des mémoires d'ordinateurs et bouleverser quelque peu les concepts informatiques actuellement en vigueur.

- R E F E R E N C E S -

- 1 - SMITS and GALLAHER
Design considerations for a semi permanent Optical Memory
Bell - Syst - Tech Journal July 1967

- 2 - L.K. ANDERSON
Holographic Optical Memory for bulk data storage
Bell Lab Record Nov. 1968

- 3 - J.A. RAJCHMAN
Promise of Optical Memories
Journal of Applied Physics - March 1970

- 4 - J.T. LA MACCHIA
Optical Memories : A progress report Laser Focus - Février 1970

- 5 - R.D. LOHMAN, R.S. MEZRICH, W.C. STEWARD
Holographic Mass memory's promise : Megabits accessible in microseconds Electronics - Janvier 1971

- 6 - H. ESCHLER, G. GOLDMAN, P. GRAF, M. LANG,
Performance of a Holographic R.O.M. and the probleme of Large capacities.
1 st - European Electrooptics Conf. Genève Sept. 1972

- 7 - L. D'AURIA, J.P. HUIGANRD, E. SPITZ
Holographic read write memory and capacity enhancement by 3-D storage
IEEE Magnetics - June 1973

- 8 - D.A. BRIGGS, P. WATERWORTH
Holographic Data recording Systems.Electro-Optics 1971 Int. Conf. Brigton

- 9 - R.J. COLLIER
Holograms for information storage
Optical Society meeting - Octobre 1968

- 10 - J.A. RAJCHMAN
An optical read - Write Mass. memory
Applied Optics - Octobre 1970

- 11 - W.C. STEWART, L.S. COSENTINO
Optics for read write holographic memory
Applied Optics Vol 9, n° 10 - Octobre 1970

- 12 - S. LOWENTHAL, Y. BELVAUX
Progrès récents en Optique Cohérente : Filtrage des Fréquences Spatiales, Holographie
Revue d'Optique - Janvier 1967

- 13 - A. MARECHAL, M. FRANÇON
Diffraction Structure des Images

- 14 - G. GOLDMANN
Recording of digital data masks in quasi Fourier holograms.
Optik 34 - 1971 p. 254-267

- 15 - G. GOLDMANN
Holographic storage of digital data Masks
Optik 34 - 1971 p. 312-320

- 16 - C.B. BURCKHARDT
Use of Random phase mask for the recording of Fourier transform holograms of data masks
Applied Optics - Mars 1970

- 17 - Y. TAKEDA, Y. OSHIDA, Y. MIYAMURA
Random phase shifters for Fourier transformed holograms
Applied Optics - April 1972

- 18 - Y. TAKEDA
High quality an high information storage density hologram memory
Japanese Journal of Applied Physics - May 1972

- 19 - L. ANDERSON
Application of holographic Optical Techniques to bulk memory
Intemag Conference - April 1972

- 20 - J.P. HUIGNARD, E. SPITZ, F. LE CARVENNEC
Etude de l'organisation générale d'une mémoire holographique
Rapport Final - contrat D.G.I.

- 21 - L. D'AURIA, J.P. HUIGNARD
Performances an l organization of holographical optical memories
1st European Electrooptics Conference - Genève, Septembre 1973

- 22 - P. GRAF, M. LANG
Geometrical Aspects of Consistent Holographic Memory
Applied Optics - July 1972

- 23 - M.A. HABEGGER, J.T. HARRIS, J. LILL
Total Internal light deflector
Applied Optics, Vol 5 n° 9 p. 1903 - Septembre
Septembre 1966

- 24 - COLLIER, BURCKHARDT, LIN
Optical holography p. 351-359

- 25 - J.C. URBACH, R.W. MEIER
Thermoplastic xerography holography
Applied Optics - Vol 5 p. 666 (1965)

- 26 - L.H. LIN, H.L. BEAUCHAMP
Write - Read erase in situ optical
Applied Optics Vol 9 - Septembre 1970

- 27 - R.S. MEZRICH
Magnetic holography
Applied Optics Vol 9 n° 10 - Octobre 1970

- 28 - S.A. KENEMAN, G.W. TAYLOR, A. MILLER
Ferroelectric - photoconductor optical storage
medium utilizing Bismuth - Titanate
Ferroelectrics Vol 1 - Octobre 1970

- 29 - S.A. KENEMAN
Hologram storage in arsenic trisulfide thin films
Applied Physics Letters Vol 19 n° 6 - Septembre 1971

- 30 - F.S. CHEN, J.T. LA MACCHIA, D.B. FRASER
Holographic storage in Lithium Niobate
Applied Physics Letters 13-223 - 1968

- 31 - J.J. AMODEI, D.L. STAEBLER
Holographic recording in Lithium Niobate
RCA Review Vol 33 - Mars 1972

- 32 - W. PHILLIPS, J.J. AMODEI, D.L. STAEBLER
Optical and holographic storage properties
of transition metal doped Lithium Niobate

- 33 - F. MICHERON, G. BISMUTH
Electrical control of fixation and erasure of Holographic
patterns in ferroelectric materials
Applied Physics Letters, Vol 20 n° 2 - Janvier 1972

- 34 - J.B. THAXTER
Electrical control of holographic storage in
Strontium Barium Niobate
Applied Physics Letters Vol 15 - Octobre 1969

- 35 - F. MICHERON, G. BISMUTH
Electrical control in photo-ferroelectric for optical
storage. Meeting on optical storage.
Aspen - Mars 1973

- 36 - P.J. VAN HEERDEN
Theory of optical information storage in solids
Applied Optics Vol 2 - April 1963

- 37 - E. SPITZ, G. BISMUTH
Etude des mémoires optiques tridimensionnelles utilisant les propriétés de l'holographie
Rapport Final - Marché DRME

- 38 - K. MIYAMOTO
The phase Fresnel lens
J. Opt. Soc. Vol 51 n° 1 - Janvier 1961

- 39 - L.B. LESEM, P.M. HIRSH, J.A. JORDAN
The kinoform : a new wavefront reconstruction device
IBM J. Res. Develop. Vol 13 n° 2 - Mars 1969

- 40 - J.W. GOODMAN, A. SILVESTRI
Some a effects of Fourier domains quantizations on holographic images
(Holography and the computer - Houston Decembre 1969)

- 41 - L. D'AURIA, J.P. HUIGNARD, A.M. ROY, E. SPITZ
Photolithographic fabrication of thin film lenses
Optics Communications Vol 5 n° 4 - July 1972

- 42 - L. D'AURIA, G. CHEVALIER, J.P. HUIGNARD, E. SPITZ
Etude d'une mémoire optique permanente adressée par une matrice de diodes électroluminescentes
Revue THOMSON-CSF Vol 5 n° 1 - Mars 1973

- 43 - G.W. TAYLOR
A method of matrix addressing polarization rotating of retarding light valve arrays
Proc. IEEE Vol 58 n° 11 - Novembre 1970

- 44 - J.R. MALDONADO, A.H. MEITZLER
Ferroelectric ceramic light gates operated in a voltage controlled mode
IEEE, on electron devices, Vol ED 17 n° 2 - Fevrier 1970

- 45 - H.N. ROBERTS
Strain biased PLZT input devices (page composers) for holographic memories and optical data processing
Applied Optics Vol 11 n° 2 - Février 1972

- 46 - PRESTON
Coherent optical computers
Mc. GRAW HILL book compagny p. 139-147