

---

# Bulletin de l'Union des Physiciens

Association de professeurs de Physique et de Chimie

---

## Hologrammes et images\*

par Michel HENRY

Maître de Conférences, Université Pierre-et-Marie Curie, Paris

---

*Pour le grand public, et aussi pour beaucoup de chercheurs, hologramme est synonyme d'image «en relief».*

*De toutes les applications de l'holographie, c'est certainement celle qui a le plus contribué à faire connaître cette technique, d'autant que plusieurs laboratoires de recherche - et non des moindres - se sont spécialisés dans la réalisation d'hologrammes spectaculaires, soit par les dimensions des objets enregistrés, soit par leur nature.*

Signe des temps, il existe à l'heure actuelle de par le monde une vingtaine d'entreprises privées, dont une demi-douzaine en France, vivant de la réalisation et de la vente d'hologrammes. Ceux-ci vont du petit médaillon à quelques dizaines de francs au tableau géant dont le coût dépasse cent mille francs.

Nous allons voir les techniques particulières mises au point pour réaliser ce type d'hologrammes, compte tenu des contraintes spéci-

\* Cet article est extrait de la revue «Auvergne Sciences» n° 6 - avril, mai, juin 1988. Nous remercions R. JOUANISSON, rédacteur de cette revue, de nous avoir autorisés à reproduire ce texte.

fiques à leur obtention et plus encore à leur observation. Nous commençons par rappeler ce qu'est, de façon générale, un hologramme.

## 1. PRINCIPE DE L'HOLOGRAPHIE

Dans toutes les techniques conventionnelles d'imagerie, comme la photographie, une image plane d'une scène à trois dimensions est enregistrée sur une surface photosensible. Il convient pour ce faire de réaliser une correspondance point par point entre la scène et le plan à l'aide d'une lentille où, plus simplement, d'un sténopé.

Or, les milieux photosensibles n'enregistrent que l'intensité lumineuse, si bien que l'information concernant les variations de chemin optique entre les divers points de l'objet est perdue. Plus précisément, nous disons que l'information d'amplitude portée par les ondes lumineuses est conservée, tandis que l'information de phase est détruite.

L'idée de base de l'holographie est d'enregistrer la totalité de l'onde lumineuse : amplitude et phase. Il convient donc de coder la phase sous forme d'intensité, puisque c'est la seule caractéristique à laquelle soient sensibles les milieux d'enregistrement. Ceci est obtenu en combinant l'onde provenant de l'objet avec une autre onde, cohérente avec la première (Figure 1). Il n'est plus nécessaire dans ces conditions de réaliser une correspondance point par point entre l'objet et le support d'enregistrement.

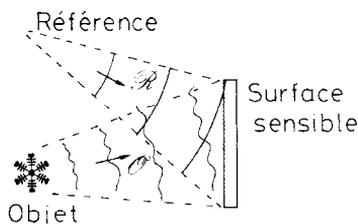


Figure 1

Nous reviendrons plus en détail sur ce processus, mais il est apparent dès à présent que l'on enregistre en fait un système de franges d'interférences.

L'hologramme contient donc aussi bien l'information d'amplitude que celle de phase, mais sous forme codée, ce qui apparaît immédiatement à quiconque regarde un hologramme.

La raison du succès de l'holographie est la facilité avec laquelle il est possible de reconstituer l'onde telle qu'elle était émise par l'objet au moment de l'enregistrement. Il suffit en effet d'éclairer l'hologramme soit avec l'onde de référence (Figure 2) soit même dans certains cas avec un faisceau lumineux tout-à-fait différent. Pour un observateur, l'onde restituée est indiscernable de l'onde originelle : la profondeur de champ et la parallaxe montrées par l'image sont les mêmes que celles de l'objet.

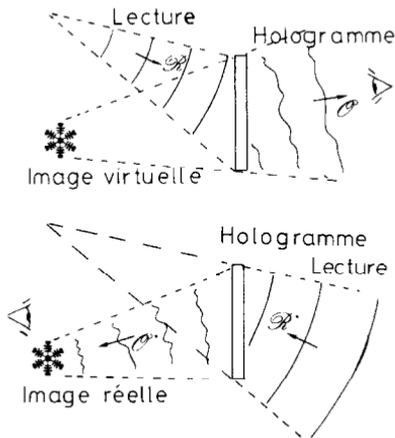


Figure 2

Précisons ce point, mais signalons tout de suite que les notions qui suivent ne sont pas indispensables à la compréhension du reste et peuvent être omises sans trop d'inconvénients.

Nous repérons chaque point de la surface plane photosensible par deux coordonnées  $x$  et  $y$ .

Nous adoptons pour alléger l'écriture la notation complexe des ondes lumineuses et posons de façon générale :

$$A(x,y) = A_0(x,y) \exp [i\varphi(x,y)]$$

$A(x,y)$  est l'amplitude complexe de l'onde lumineuse,  $A_0(x,y)$  son

amplitude réelle, qui porte l'information de luminosité, et  $\varphi(x,y)$  sa phase, qui porte l'information de distance.

Soit  $O(x,y)$  l'amplitude complexe de l'onde transmise ou réfléchie par l'objet, dite «onde objet» pour plus de simplicité, et  $R(x,y)$  l'amplitude complexe de l'onde que nous combinons à l'onde objet et que nous nommons onde de référence.

Notons bien que  $O(x,y)$  et  $R(x,y)$  sont les valeurs prises sur la surface sensible par les ondes correspondantes. Par ailleurs, ces deux ondes sont cohérentes, c'est-à-dire capables d'interférer, ce qui est indispensable pour réaliser un hologramme. L'amplitude complexe totale sur la surface sensible est donc :

$$O(x,y) + R(x,y)$$

Pour plus de simplicité, et aucune confusion n'étant possible, nous supprimons désormais les indications  $x$  et  $y$ .

L'intensité lumineuse enregistrée est égale au produit de l'amplitude complexe par la quantité complexe conjuguée.

$$I = (O + R) \cdot (O^* + R^*)$$

Cette expression représente le système de franges d'interférences dont nous avons parlé plus haut et définit en quelque sorte l'hologramme.

L'hologramme étant enregistré et éventuellement soumis à un traitement physico-chimique convenable, tel le développement et le fixage pour une plaque photographique, est éclairé par une onde dite onde de lecture d'amplitude complexe  $L(x,y)$ . Il transmet une onde dont nous pouvons toujours mettre l'amplitude complexe sous la forme  $\tau L(x,y)$ , où le coefficient  $\tau$  est dit transparence en amplitude.

Le point intéressant est que tous les milieux photosensibles peuvent être traités de façon que  $\tau$  soit une fonction linéaire de l'intensité  $I$ , au moins en première approximation. D'autre part, nous avons parlé de transmission pour fixer les idées, mais ce résultat est aussi applicable au cas où l'hologramme est utilisé par réflexion.

L'amplitude complexe de l'onde transmise est dans ces conditions :

$$T = \tau L = (a + b I) L$$

Remplaçons  $I$  par son expression en fonction de  $O$  et de  $T$  et réarrangeons les divers termes de  $T$ . Il vient :

$$T = (a+bOO^* + bRR^*) L + bOR^*L + bO^*RL$$

Les deux termes  $OO^*$  et  $RR^*$  sont des nombres réels, de même que  $a$  et  $b$ . Le premier facteur de  $T$  reconstitue simplement l'onde de lecture et ne porte aucune information utile.

Si  $L = R$ , c'est-à-dire si l'onde de lecture est identique à l'onde de référence, le produit  $R^*L$  est réel et le second facteur de  $T$  représente à un coefficient réel près l'amplitude complexe de l'onde objet. C'est précisément là le fondement et l'intérêt de l'holographie : l'observateur recevant cette onde aura les mêmes sensations que s'il recevait l'onde objet  $O$  (Figure 2).

Si au contraire  $L = R^*$ , c'est-à-dire si l'onde de lecture est conjuguée de l'onde de référence, c'est le terme  $LR$  qui est réel et le troisième facteur représente au coefficient réel près l'onde  $O^*$  conjuguée de l'onde objet (Figure 2). Nous verrons un peu plus loin l'intérêt de cette remarque et le rôle joué par l'onde  $O^*$ .

Avant de poursuivre, signalons une application curieuse de ce qui précède (Figure 3).

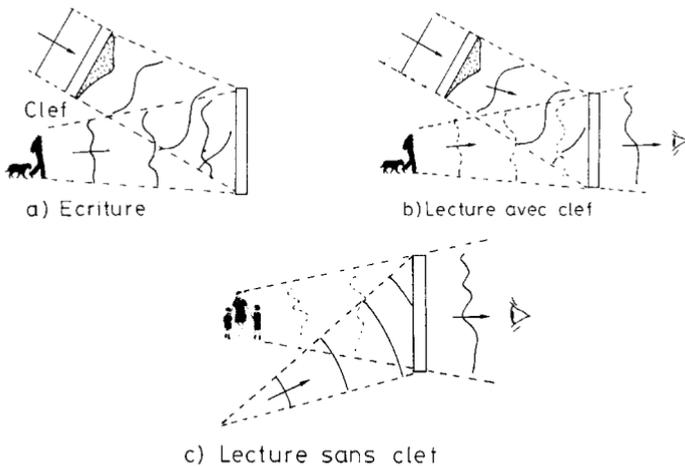


Figure 3

Nous n'avons fait aucune hypothèse sur la forme des ondes R et L. Pour des raisons techniques évidentes, ce sont en général des ondes planes ou sphériques, mais rien ne s'oppose à ce qu'elles soient plus compliquées. Il est ainsi possible de coder de façon simple un message.

Réalisons une diapositive du message et utilisons cette diapositive comme l'objet dont nous fabriquons un hologramme. Choisissons comme onde de référence l'onde fortement déformée résultant de la traversée d'une lame de verre inhomogène (verre «cathédrale») par une onde plane et enregistrons l'hologramme. Pour restituer le message de façon qu'il soit compréhensible, il faudra que l'onde de lecture soit déformée de la même façon que l'onde de référence... Bien entendu, la méthode est applicable à l'hologramme de n'importe quel objet.

## 2. IMAGES HOLOGRAPHIQUES

Le principe de l'holographie est donc la superposition, sur une surface photosensible, des ondes objet et de référence, de façon à créer un système de franges d'interférence. Les deux ondes doivent, en pratique être dérivées de la même source de lumière. En théorie, toute source pourrait convenir - Gabor utilisait une lampe à vapeur de mercure - mais en fait, un laser est indispensable. Tout le problème de l'imagerie holographique va donc résider dans l'agencement convenable des composants optiques et dans le choix judicieux de la surface sensible.

Nous allons tout d'abord préciser quelques points, qui nous aideront à bien saisir le pourquoi de certaines réalisations.

### 2.1. Image réelle - Image virtuelle

En général, nous cherchons à réaliser l'hologramme d'un objet réel. Par force, chaque point de celui-ci envoie vers la surface sensible une onde sphérique divergente. L'onde de lecture restitue une onde divergente, et le point correspondant nous paraît situé derrière l'hologramme. Nous parlons alors d'image virtuelle.

Inversement, fabriquons une onde convergente, et interposons la plaque sensible avant le point de rencontre des rayons lumineux. Lors de la restitution, nous obtiendrons encore une onde convergente et un point lumineux situé cette fois en avant de l'hologramme. Nous dirons alors que nous avons une image réelle, ce qui recoupe d'ailleurs les no-

tions classiques de réalité et de virtualité d'objets ou d'images, l'image réelle restituée par un hologramme pouvant être recueillie sur un écran (Figure 4).

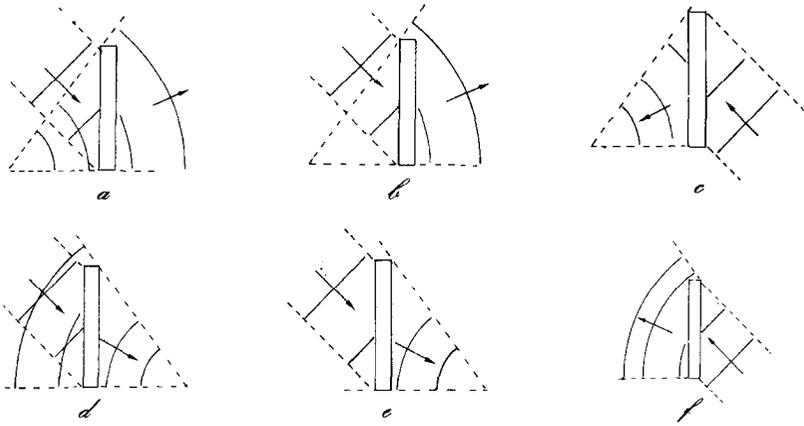


Figure 4

Toutefois, l'holographie nous fournit une autre solution pour former des images réelles ou virtuelles. Nous avons vu dans le paragraphe précédent que tout hologramme pouvait restituer l'onde conjuguée de l'onde objet, à condition d'être convenablement éclairé. Or l'onde conjuguée d'une onde divergente est une onde convergente et réciproquement.

Une conséquence intéressante est la suivante : à partir de l'hologramme d'un objet réel quelconque, nous pouvons obtenir soit une image virtuelle, en utilisant une onde de lecture identique à l'onde de référence, ou bien une image réelle, à condition de prendre pour onde de lecture l'onde conjuguée de l'onde de référence.

## 2.2. Orthoscopie-Pseudoscopie

L'image réelle ainsi restituée, à partir de l'onde conjuguée de l'onde de référence, présente un inconvénient : les points de l'objet les plus éloignés de l'hologramme, donc situés à l'arrière pour l'observateur sont également les plus éloignés de l'hologramme dans l'image restituée et paraissent donc en avant pour l'observateur, ce qui inverse la perspective (Figure 5). Une telle image est dite pseudoscopique, alors qu'une image à perspective normale est dite orthoscopique.

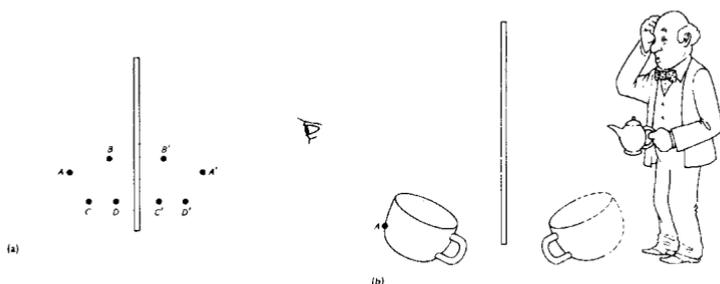


Figure 5

Les images réelles étant bien entendu beaucoup plus spectaculaires que les images virtuelles, le réalisateur d'hologrammes devra prendre garde à ce phénomène, d'autant plus que les parties cachées, normalement situées en arrière sont à présent en avant, ce qui donne un aspect encore plus bizarre.

### 3. RÉALISATIONS PRATIQUES

#### 3.1. Hologramme de Leith-Upatnieks

C'est le montage le plus ancien et aussi l'un des plus utilisés par les débutants car l'un des plus simples à mettre en place (Figure 6). Le faisceau laser est divisé en deux par un séparateur de faisceaux. L'un des faisceaux secondaires éclaire l'objet, l'autre est dirigé vers la surface sensible, en général une plaque ou un film photographique. Le fait d'incliner le faisceau de référence par rapport au faisceau objet assure que lors de la restitution le faisceau directement transmis ne gênera pas l'observation de l'image. C'est d'ailleurs cette idée de Leith et Upatnieks qui, permettant d'obtenir des images exploitables, donna le coup d'envoi de l'holographie.

Toutefois ce type d'hologramme présente des inconvénients qui en limitent considérablement l'application aux exhibitions : faible luminosité de l'image, champ d'observation réduit, exigence d'une lumière monochromatique - voire d'un laser - pour l'observation. Nous allons voir à présent quelques unes des méthodes mises au point pour s'affranchir de ces limitations.

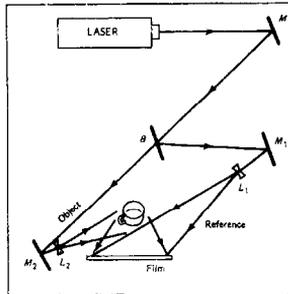


Figure 6

### 3.2. Hologramme image

Nous avons vu que l'image réelle restituée à partir de l'onde conjuguée de l'onde de référence présente une inversion de perspective, la pseudoscopie. Il est possible de pallier cet inconvénient en formant une image de l'objet à l'aide d'un système optique convenable, une lentille ou un miroir concave (Figure 7). Si cette image est réelle, nous pouvons placer la surface sensible avant elle ou même à travers elle. Dans le premier cas l'image restituée est réelle et située en avant de l'hologramme ; dans le second, elle est mi-virtuelle, mi-virtuelle et paraît « à cheval » sur l'hologramme.

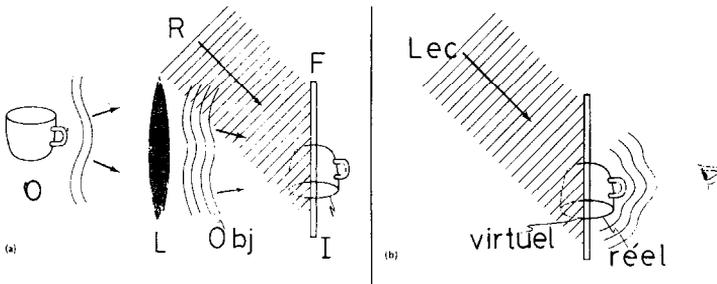


Figure 7

C'est ainsi que sont réalisés les hologrammes les plus spectaculaires, souvent à but publicitaire.

Une autre solution, aussi employée dans la pratique, consiste à util-

iser comme objet l'image réelle pseudoscopique fournie par un hologramme. Le lecteur vérifiera sans peine qu'un nombre convenable d'inversions permet d'obtenir une image réelle orthoscopique.

### 3.3. Hologramme cylindrique

Un hologramme «classique» ne montre qu'une des faces de l'objet. Il est possible de les voir toutes grâce à un hologramme cylindrique. L'objet est entouré par une bande de film holographique, ou, à défaut, par quelques plaques.

Dans le montage le plus simple, le faisceau laser est élargi par une lentille de courte focale (Figure 8). La partie centrale éclaire l'objet et forme, après réflexion, l'onde objet, tandis que la partie périphérique constitue l'onde de référence.

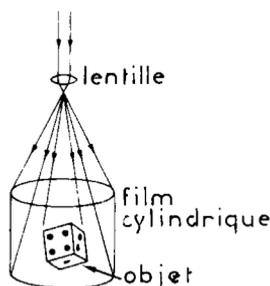


Figure 8

L'observation demande un laser placé dans la même position que celui utilisé pour l'enregistrement, ce qui est un peu gênant.

### 3.4. Hologramme composite

Une autre méthode est celle dite de l'hologramme composite.

Le montage est celui de Leith mais l'objet est placé sur un plateau tournant et une fente verticale se déplace devant la surface sensible (Figure 9). La rotation de l'objet et le déplacement de la fente sont synchronisés, si bien qu'à chaque position de l'objet correspond un hologramme particulier enregistré sur une bande étroite. Quand l'hologramme composite est éclairé par l'onde de lecture, l'observateur ne voit qu'une image de l'objet. Toutefois, en déplaçant latéralement la

tête, il lui semble voir l'image tourner autour d'un axe vertical si bien que l'angle de vision effectif peut atteindre  $360^\circ$ .

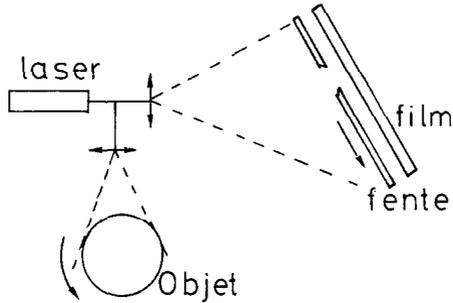


Figure 9

Un inconvénient est que les deux yeux ne voient pas la même image, ce qui peut provoquer une sensation de relief exagérée. Il est possible d'y remédier en plaçant la fente horizontalement (et en déplaçant la tête verticalement) mais cela entraîne la perte de la parallaxe verticale.

### 3.5. Hologramme à double face

Un autre procédé consiste à enregistrer deux hologrammes sur la même surface, de façon que l'observation d'un côté montre la face de l'objet et l'observation de l'autre côté montre le dos. Si les positions des deux images sont bien choisies, la perspective originelle est conservée et l'hologramme paraît contenir l'objet.

Voici comment l'on peut procéder (Figure 10) :

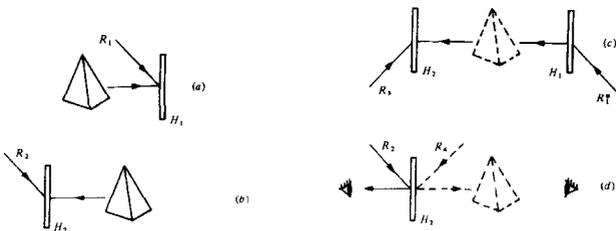


Figure 10

La première étape consiste à réaliser un hologramme sur une plaque P1, avec une onde de référence R1. Sans toucher à l'objet, on enregistre une plaque P2 avec un faisceau de référence R2.

Ensuite, l'objet est enlevé et la plaque P1 est éclairée par une onde  $R^*1$ , conjuguée de R1. Il se forme alors une image réelle de l'objet qui sert à son tour d'objet pour la plaque P2, avec une onde de référence R3. La plaque P2, traitée, constitue l'hologramme définitif. Pour observer l'image, il faut l'éclairer d'un côté par l'onde R2 et de l'autre par l'onde  $R^*3$ , conjuguée de R3. Il peut alors être vu des deux côtés et montre l'avant et l'arrière de l'objet, correctement placés l'un par rapport à l'autre.

### 3.6. Stéréogramme

Un problème majeur, avec les dispositifs précédents est que l'objet doit être éclairé avec un laser. C'est un inconvénient pour des objets de grande taille - sauf à utiliser un laser très puissant - et encore plus pour un être vivant.

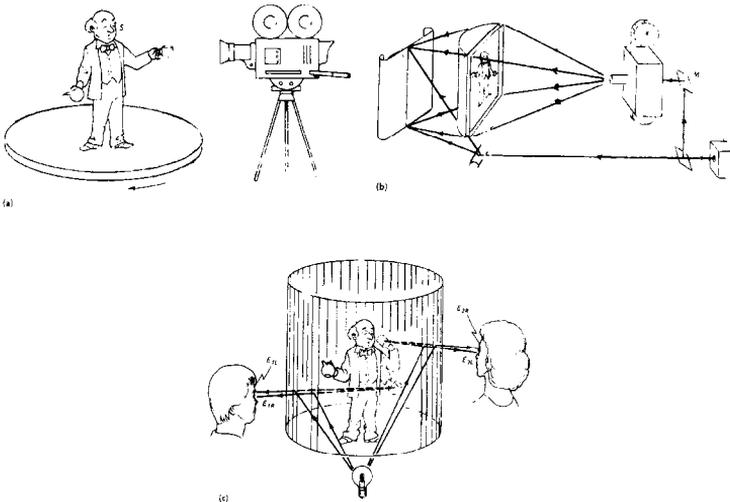


Figure 11

Il est possible de contourner cette difficulté en réalisant une série de photographies de l'objet, prises sous divers angles puis en enregistrant un hologramme de chaque photographie sur une bande étroite de film

(Figure 11). Ces bandes sont ensuite juxtaposées - comme les planches d'une palissade - en respectant l'ordre logique d'apparition et de façon que chaque œil ne voie qu'une seule image restituée. La sensation de relief est obtenue par stéréoscopie, les deux yeux voyant des images légèrement différentes.

L'impression de mouvement résulte du déplacement relatif de l'observateur et de l'hologramme, ce qui assure la succession des images.

Il ne s'agit pas d'hologrammes au sens strict du terme. En fait, l'holographie ne sert qu'à stocker les images et à permettre leur observation sous une forme plus commode.

L'«objet» peut bien entendu être une personne exécutant un mouvement quelconque. Pour des raisons pratiques, la prise de vues ne peut durer que quelques dizaines de secondes ou quelques minutes, ce qui représente de 1000 à 3000 images, et autant d'hologrammes élémentaires. Une application récente est la fabrication d'«holoclips», analogues aux vidéoclips et à usage publicitaire pour l'essentiel.

L'«objet» peut aussi être un ensemble d'images réalisées par ordinateur. Cette application est actuellement en plein essor, tant dans un but artistique ou publicitaire que scientifique : pour ce dernier cas, citons à titre d'exemple, l'observation de structures moléculaires complexes.

### 3.7. Hologrammes par réflexion

Les méthodes vues jusqu'ici fournissent des hologrammes par transmission, ainsi nommés parce que la lumière de lecture les traverse avant de pénétrer dans l'œil de l'observateur. L'inconvénient majeur est que l'onde de lecture doit être en principe identique à l'onde de référence. En fait, l'observation visuelle n'exige pas que l'onde de lecture soit cohérente sur la totalité de la surface de l'hologramme : l'œil, en effet, n'utilise que des faisceaux étroits s'appuyant sur la pupille. Il est possible, dans ces conditions, de remplacer le laser par une source plus commode d'emploi, telle qu'une lampe à vapeur de mercure ou de sodium.

Des conditions opératoires convenables permettent de s'affranchir de cette contrainte et autorisent l'emploi de lumière blanche, à condi-

tion toutefois que le diamètre apparent de la source de lumière reste petit (source ponctuelle).

L'une de ces conditions consiste à envoyer l'onde de référence - toujours fournie par un laser, elle, - en sens opposé de l'onde objet (Figure 12). Ces deux ondes se propageant en sens inverse donnent naissance dans l'épaisseur de l'émulsion à une structure complexe. L'hologramme ainsi réalisé est dit hologramme par réflexion car l'onde de lecture doit être située du même côté de l'hologramme que l'observateur. Le point important est que l'on puisse utiliser de la lumière blanche. Cette particularité est due aux ondes stationnaires produites dans l'épaisseur de l'émulsion, qui filtrent la lumière, comme le ferait un filtre interférentiel.

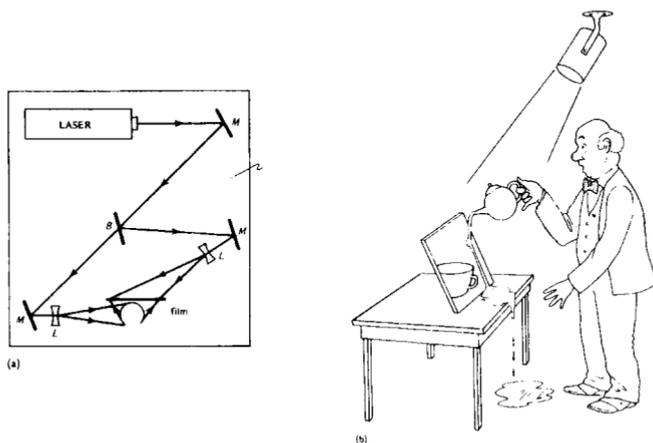


Figure 12

### 3.8. Hologrammes arc-en-ciel

Une autre méthode permettant l'observation en lumière blanche consiste à sacrifier une partie de l'information, en l'espèce la parallaxe verticale, ce qui n'est pas très gênant.

La première étape de la fabrication d'un hologramme arc-en-ciel (Figure 13) est l'enregistrement par un procédé conventionnel d'un hologramme maître Ho. Celui-ci est ensuite masqué par un écran ne laissant libre qu'une fente horizontale et éclairé de façon à former une image réelle. L'onde lumineuse issue de Ho ainsi modifiée est combinée à une nouvelle onde de référence pour donner l'hologramme définitif

H1, lequel enregistre non seulement l'information «objet» mais aussi l'information «fente». La restitution à partir de H1 donne une image de l'objet, plus une image de la fente par laquelle passe toute la lumière. C'est bien entendu là où l'observateur doit placer les yeux (Figure 14). Si l'hologramme est éclairé en lumière blanche, chaque radiation crée sa propre image de la fente, décalée par rapport aux autres. L'hologramme change de couleur suivant la position des yeux devant la fente, d'où son nom.

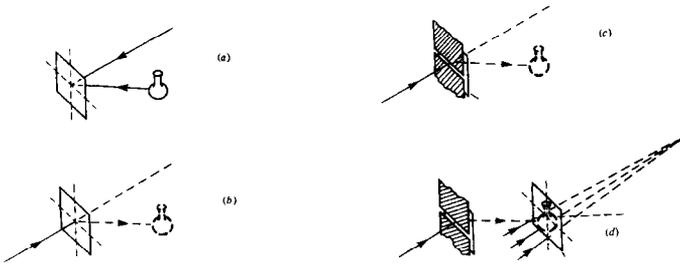


Figure 13

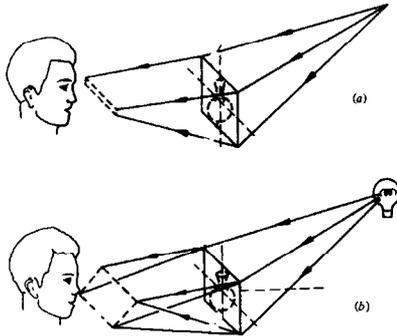


Figure 14

A la différence des hologrammes par réflexion, il est très facile de reproduire un hologramme arc-en-ciel, ainsi que nous le verrons dans le paragraphe suivant, aussi constituent-ils la variété la plus répandue, celle des cartes de vœux et aussi des cartes de crédit.

#### 4. COPIE D'HOLOGRAMMES

La réalisation d'un hologramme est toujours longue et demande un matériel relativement sophistiqué : laser, mécanique de précision pour les supports... Pour obtenir plusieurs exemplaires, il est envisageable d'en réaliser autant que nécessaire, mais le procédé devient inapplicable au-delà de quelques unités. Il convient donc de trouver un procédé permettant la copie d'un hologramme.

Le procédé le plus simple est une copie par contact, mais donne en général de mauvais résultats en raison de la diffraction de la lumière par l'original.

Une meilleure solution consiste à utiliser l'image restituée par l'original comme objet pour la copie, l'onde restituée étant combinée à une onde de référence convenable. Cette méthode est très flexible mais les exigences de cohérence de la source et de stabilité du dispositif expérimental sont aussi contraignantes que pour l'enregistrement de l'original.

La seule méthode permettant d'obtenir un très grand nombre de copies - jusqu'à plusieurs millions - est la suivante :

L'original est enregistré sur une résine photosensible qui possède la particularité de rester transparente et de traduire les variations d'éclairement (les franges d'interférences) par des variations d'épaisseur. Cet original est ensuite métallisé de façon à former une matrice puis un poinçon qui permettra d'obtenir un grand nombre de copies par pressage d'une résine convenable, de la même façon que les disques micro-sillon.

Pour être visibles en lumière blanche, condition sine qua non d'une grande diffusion, les hologrammes originaux sont toujours des hologrammes arc-en-ciel, ainsi qu'il est facile de s'en assurer en les regardant de près.

#### 5. CONCLUSION

Nous n'avons pu donner ici qu'un bref aperçu des techniques permettant de réaliser des images holographiques. Outre les applications

pratiques, comme la sécurité bancaire ou la muséographie, les images holographiques apparaissent de plus en plus comme une nouvelle forme d'art. C'est peut-être le domaine qui permettra les progrès les plus importants, les artistes n'étant limités que par leur imagination et n'ayant d'autres contraintes que techniques. Pour terminer, nous vous racontons une petite histoire, dont nous nous garderons bien de tirer une quelconque moralité.

En 1972, la bijouterie Cartier, à New-York, installa en vitrine un hologramme d'un bijou, un collier de diamants. L'hologramme déplaça les foules jusqu'à ce qu'une dame âgée brise à coups de parapluie cette œuvre satanique...