

Holographie

1 Introduction

L'holographie est un procédé permettant d'enregistrer sur un support 2D les informations nécessaires à la reconstruction 3D d'un objet. Cela n'est possible qu'en enregistrant à la fois l'intensité et la phase des ondes émises par chaque point de l'objet : c'est en effet une conséquence du principe d'Huygens-Fresnel que la connaissance *complète* d'une onde sur une surface (2D) permet de la connaître dans tout le demi espace (3D) au-delà de cette surface. Or les supports classiques d'enregistrement d'image (plaques photos, capteur CCD etc...) ne sont sensibles qu'à l'intensité de l'onde, pas à sa phase.

Nous allons voir dans ce chapitre comment enregistrer sur un même support simultanément les informations d'intensité et de phase d'une onde, c'est à dire comment réaliser un hologramme. Puis nous verrons comment le lire afin de restituer l'image 3D. Enfin, quelques applications de l'holographie seront présentées.

2 Principes de l'holographie

Cette partie présente l'holographie classique analogique et est assez largement inspirée de R-J. Champeau et al. "Ondes lumineuses". On abordera l'holographie numérique dans la partie suivante.

2.1 Photographie ordinaire

On s'intéresse ici à la photographie noir et blanc sur support "argentique". Ce support est recouvert d'une couche sensible à la lumière, par exemple du bromure d'argent qui noircit à la lumière. Après un traitement approprié, appelé développement, les zones du support qui ont été exposées à la lumière apparaissent sombres et sont d'autant plus opaques que l'intensité lumineuse qu'elles ont reçue était grande. On obtient un négatif. L'étape suivante consiste à inverser zones obscures et zones claires : on passe du négatif au positif, qui est l'image qu'on cherche à obtenir d'ordinaire. En holographie, on en reste au stade du négatif.

2.2 Représentation d'un objet 3D

La plaque photographique est donc sensible à l'intensité lumineuse, mais la phase de l'onde est perdue. Une photo ne peut donc pas donner une représentation complète d'un objet 3D. Il convient ici de distinguer une telle représentation des images en 3D qu'on peut voir au cinéma : ces dernières sont constituées de deux photos d'une même scène, prises sous un angle légèrement différent. Chacune correspond à l'image que verrait chaque oeil d'un observateur. On adresse alors chaque image à l'oeil correspondant et à partir de ces deux points de vue, le cerveau reconstruit l'image en 3D. De telles images 3D ne changent pas si on tourne la tête, alors que la représentation 3D d'un objet réel change car on le voit depuis une position différente et certaines zones qui étaient d'abord occultées deviennent visibles.

Il s'avère qu'un tel effet est reproductible par un enregistrement 2D de la totalité de l'onde émise par un objet (intensité et phase) en vertu du principe d'Huygens-Fresnel mentionné dans l'introduction. Et c'est là le coeur de l'holographie. La difficulté principale est de parvenir à enregistrer la phase de l'onde émise par l'objet.

2.3 Codage de la phase

Comme on l'a vu, l'enregistrement de l'intensité de l'onde ne pose pas de problème sérieux. Par contre, il va falloir être astucieux pour parvenir à enregistrer les variations de phase de l'onde sous forme de variations d'intensité. Cette opération est possible en recourant aux interférences, essentiellement en superposant l'onde émise par l'objet à une onde de référence dont la phase est connue, par exemple une onde plane.

Pour obtenir des interférences entre l'onde émise par l'objet et l'onde de référence, il faut qu'elles aient une bonne cohérence mutuelle (issues de la même source). Il faut aussi une bonne cohérence temporelle de la lumière car l'onde de référence et celle émise par l'objet ont généralement des chemins optiques différents : la longueur de cohérence de la source doit être supérieure à cette différence. Enfin, il faut une bonne cohérence spatiale, l'aire de cohérence devant être supérieure aux dimensions de la zone enregistrée. Dans le domaine visible, ces conditions ne sont réunies qu'avec un laser.

Si on désigne par $A_O = a_O e^{i\phi_O}$ l'amplitude complexe de l'onde émise par l'objet et par $A_R = a_R e^{i\phi_R}$ celle de l'onde de référence, l'intensité résultant de la superposition est :

$$I = |A_O + A_R|^2 = a_O^2 + a_R^2 + 2a_O a_R \cos(\phi_O - \phi_R)$$

Les variations de I dépendent de la différence de phase entre les deux ondes et de leurs intensités. Comme la phase et l'intensité de l'onde de référence sont supposées connues, I dépend de ϕ_O et de a_O . Cependant, ces deux grandeurs sont intriquées et il n'est pas possible de déterminer leurs valeurs de manière univoque à partir de la valeur de I . Cette difficulté est surmontée par la méthode de lecture des hologramme, comme on le verra plus loin.

2.4 Enregistrement d'un hologramme

Il y a essentiellement deux montages pour réaliser l'enregistrement d'un hologramme.

2.4.1 Montage en ligne

Le premier est un montage "en ligne" représenté sur la figure 1. Ce montage est celui utilisé

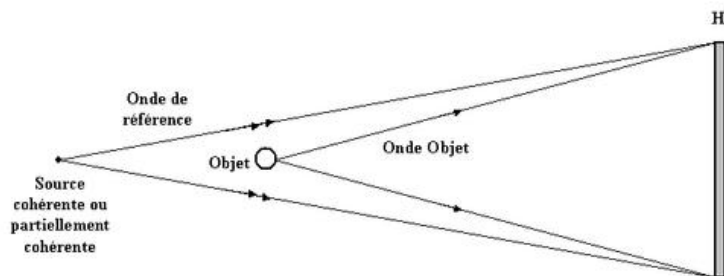


Figure 1: Montage d'enregistrement en ligne. L'objet dont on veut faire l'hologramme se trouve sur le chemin de l'onde de référence et en diffuse une partie. Il y a interférence entre l'onde de référence et l'onde diffusée. C'est pratique pour les petits objets ou les objets transparents. Inconvénient : à la lecture, l'image de l'objet est superposée à d'autres images.

historiquement par Dennis Gabor, l'inventeur de l'holographie, en 1948. Il a l'avantage d'assurer l'égalité des chemins optiques parcourus par les ondes objet et référence et la source n'a pas besoin d'avoir une grande longueur de cohérence. Cela empêche néanmoins de travailler avec des sources lumineuses classiques : Gabor ne travaillait pas avec de la lumière mais des électrons (microscope électronique). Le laser n'existait pas à l'époque.

Le montage en ligne permet de faire des hologrammes de petits objets peu diffusants, ou d'objets transparents introduisant une variation de phase. Son principal inconvénient est qu'à la lecture, l'image de l'objet est superposée à d'autres images.

2.4.2 Montage hors ligne

Avec l'apparition du laser, on a pu séparer le faisceau objet du faisceau référence (1962, laser inventé en 1960). On a alors un montage similaire à celui présenté sur la figure 2. Le faisceau

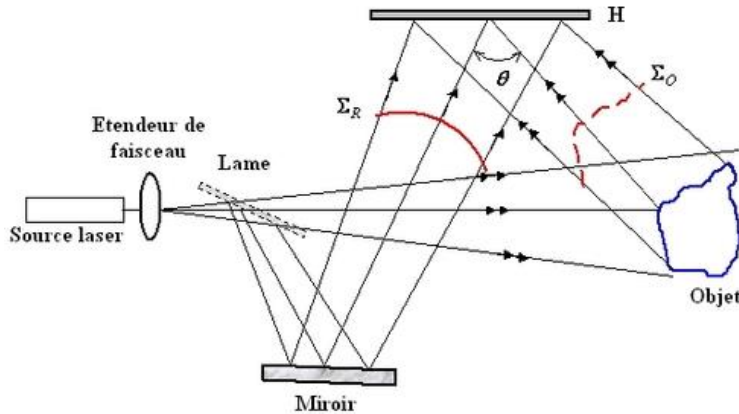


Figure 2: Montage hors ligne utilisé couramment pour faire des hologrammes à partir d'une source laser. On sépare le faisceau laser en deux parties d'intensités inégales. La partie la plus intense va éclairer l'objet. La partie la moins intense va interférer sur la plaque avec l'onde diffusée par l'objet. A la lecture, l'image de l'objet est séparée des autres images.

laser est séparé en deux faisceaux d'intensités inégales. Le faisceau d'intensité la plus faible sera le faisceau de référence. On l'élargit pour qu'il puisse éclairer la totalité de plaque. Le faisceau de plus forte intensité est élargi pour éclairer l'objet. La lumière diffusée par l'objet interfère sur la plaque avec l'onde de référence et forme l'hologramme. Comme les ondes objet et référence arrivent sous des angles différents sur la plaque, l'image de l'objet sera séparée des autres images.

Les hologrammes artistiques sont réalisés selon un autre montage, dit d'holographie par réflexion. Cela sera brièvement présenté dans une autre partie.

2.4.3 Transmittance de l'hologramme développé

Après développement, l'hologramme est sombre là où il a été fortement éclairé, et clair là où il a été peu éclairé. La transmittance varie linéairement avec l'éclairement autour d'une certaine valeur seulement. Pour les plaques dont on dispose au lycée, il s'agit d'un éclairement de $25 \mu\text{J}/\text{cm}^2$. Il faut donc ajuster la puissance moyenne de la superposition des deux ondes et le temps d'exposition pour obtenir cet éclairement moyen.

Il faut aussi voir que les franges d'interférence ont un interfrange de l'ordre de la longueur d'onde utilisée (au lycée : 633 nm). Il faut donc une résolution au moins deux fois plus fine (au lycée : $5000 \text{ traits}/\text{mm}$ soit une résolution de 200 nm). Cette résolution est beaucoup plus grande que celle des films argentiques pour photo ($10 \mu\text{m}$).

Autour de la valeur optimale d'éclairement, la transmittance de l'hologramme après développement s'écrit $t = t_0 - \beta I$ où I est l'intensité reçue. En tenant compte de ce que $I = (A_O + A_R)(A_O^* + A_R^*)$, on en déduit :

$$\begin{aligned} t &= t_0 - \beta(A_O A_O^* + A_R A_R^* + A_R A_O^* + A_R^* A_O) \\ t &= t'_0 - \beta A_R A_O^* - \beta A_R^* A_O \end{aligned}$$

avec $t'_0 = t_0 - \beta(|A_R|^2 + |A_O|^2)$.

2.5 Lecture de l'hologramme. Restitution de l'objet.

Pour visualiser l'image, on éclaire l'hologramme développé avec l'onde de référence. Le montage est semblable à celui d'enregistrement, mais on a supprimé le faisceau objet ainsi que l'objet lui-même. Voir figure 3. L'hologramme diffracte l'onde de référence. Sur la face

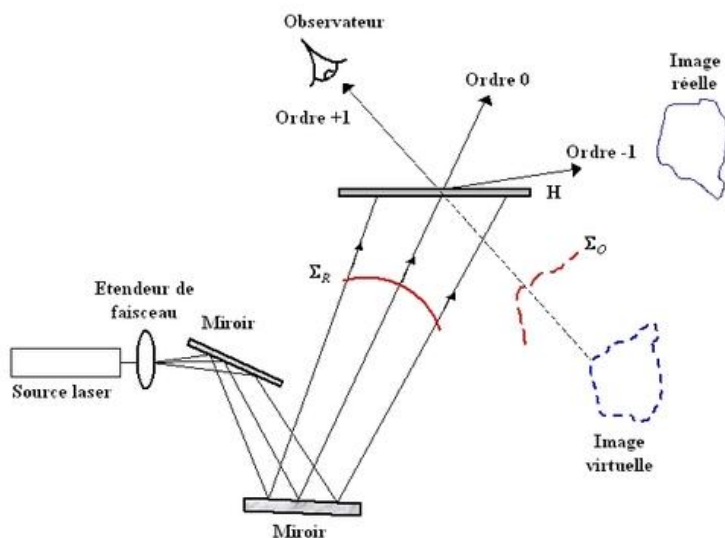


Figure 3: Montage pour la lecture d'un hologramme. On éclaire celui-ci avec l'onde de référence : elle est diffractée par l'hologramme. On obtient alors essentiellement trois ordres de diffraction : l'ordre 0 est la transmission directe de l'onde de référence. L'ordre +1 correspond à l'onde objet : on voit une image virtuelle de l'objet à la position qu'il occupait et si on tourne la tête on voit différents points de vue de l'objet. L'ordre -1 correspond à une image réelle de l'objet : cette image est projetable sur un écran et on voit une coupe de l'objet à la position de l'écran. Cette image est symétrique de la position de l'objet par rapport à la plaque.

de sortie de l'hologramme, l'amplitude de l'onde diffractée s'écrit :

$$A_d = tA_R = t'_0A_R - \beta A_R^2 A_O^* - \beta I_R A_O$$

Le premier terme est l'onde de référence qui traverse la plaque (ordre 0 de diffraction).

Le troisième terme est proportionnel à l'onde objet A_O : c'est l'onde qui permet de reconstruire l'objet et de voir son image à la position qu'il occupait. Il donne lieu à une image virtuelle en 3D (ordre +1 de diffraction). Il est important de noter ici que l'intensité I_R de l'onde de référence est uniforme (onde plane) et n'entraîne donc pas de variation d'intensité dans la restitution de A_O .

Le deuxième terme s'interprète de façon moins immédiate. Il s'avère qu'il correspond à une image réelle de l'objet, projetable sur un écran (ordre -1 de diffraction).

Ainsi, il y a bien une onde identique à l'onde objet au-delà de l'hologramme et on restitue bien une image 3D de l'objet. Il y a aussi d'autres ondes. Les trois ordres de diffraction sont superposés dans le montage en ligne, ce qui complique la lecture de l'hologramme. Par contre, l'image est facilement visible dans un montage hors ligne.

3 Holographie numérique

L'holographie numérique consiste à enregistrer l'hologramme non pas sur une plaque, mais à l'aide d'un capteur numérique CCD ou CMOS.

Les avantages sont : la réutilisation du support d'enregistrement, l'acquisition rapide d'un hologramme (il n'y a pas de développement à faire), l'acquisition rapide de plusieurs hologrammes successifs.

Les inconvénients : la résolution actuelle d'une caméra est dix fois moins bonne que la résolution des plaques, il faut tatonner pour reconstruire numériquement l'objet à la bonne position.

La reconstruction numérique de l'objet se fait en simulant numériquement la diffraction de la lumière par l'hologramme. A une distance donnée du capteur, on peut reconstruire l'onde diffractée, et il y a une distance où l'objet est net.

Cette méthode fait l'objet de recherches et de développements depuis une quinzaine d'années. Elle permet l'étude quantitative de petits objets avec une excellente résolution axiale, mais aussi l'étude de la position et de la vitesse de traceurs dans un écoulement : on en déduit les propriétés de celui-ci, ce qui est important en mécanique des fluides, géophysique (étude de l'atmosphère), médecine, et dans l'industrie.

L'holographie numérique peut se faire en couleurs : il faut alors une caméra couleur spéciale. Une caméra couleur standard, sensible au rouge, vert et bleu, va fournir des hologrammes dans chacune de ces couleurs. Les images rouge, vert et bleu reconstruites sont de différentes tailles et positions, ce qui fait qu'on ne peut pas les superposer pour obtenir une image 3D en couleurs.

4 Holographie par réflexion

L'holographie par réflexion est employée pour fabriquer les hologrammes qu'on rencontre dans la vie courante : images d'art, marquage de sécurité pour billets de banque par exemple etc... Une caractéristique de ces hologrammes est qu'ils sont lisibles sans l'aide d'un laser, avec l'éclairage ambiant.

4.1 Enregistrement

On place l'objet *derrière* la plaque holographique et l'onde de référence arrive sur la face avant. L'essentiel de l'intensité de l'onde de référence traverse la plaque et est diffusée par l'objet. On enregistre alors sur la plaque les interférences entre l'onde de référence et l'onde diffusée par l'objet.

Ce qui change par rapport aux montages précédents, c'est la direction du plan dans lequel se trouve les franges d'interférences. Dans les montages précédents, les vecteurs d'onde des deux ondes interférant étaient presque parallèles, en incidence quasi-normale sur la plaque. Les franges étaient alors perpendiculaires au plan de la plaque. Voir figure 4 (a).

Dans le montage par réflexion, les deux vecteurs d'onde sont de direction opposée, et les franges sont dans des plans parallèles à la plaque : plusieurs plans de franges s'inscrivent dans l'épaisseur du support sensible et forment un réseau de Bragg. Voir figure 4 (b). On ne procède pas à un développement traditionnel, où on obtiendrait des variations d'absorption dans l'épaisseur de l'hologramme. On introduit dans le développement une opération appelée blanchiment qui transforme les variations d'absorption en variation d'indice de réfraction. C'est cette variation de l'indice qui fait que l'hologramme développé se comporte comme un réseau de Bragg.

Il est à noter qu'un tel hologramme ne peut pas être enregistré numériquement.

4.2 Lecture de l'hologramme

Si l'hologramme n'est pas blanchi, on observe l'image en éclairant l'hologramme avec l'onde de référence, en plaçant l'œil du côté de l'onde de référence.

S'il est blanchi, on peut l'observer en lumière blanche. En effet, pour une direction d'observation donnée, le réseau de Bragg va sélectionner la longueur d'onde pour laquelle il donne des interférences constructives en réflexion et on voit l'objet coloré. Si on incline l'hologramme, l'épaisseur traversée par la lumière change et la longueur d'onde donnant des interférences

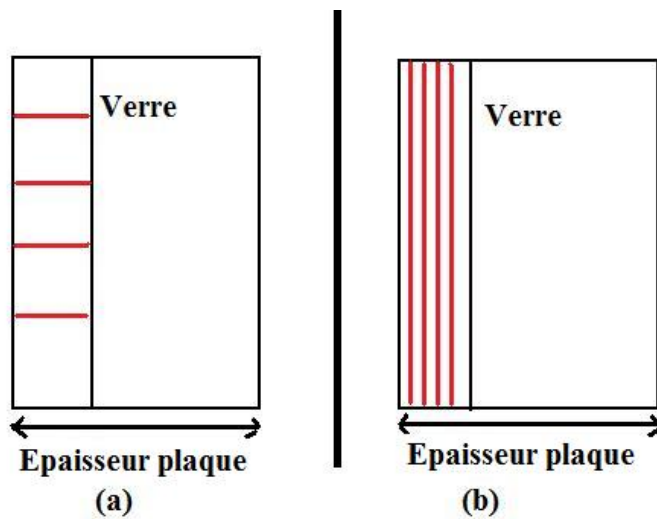


Figure 4: (a) Dans un montage classique, les franges d'interférences sont perpendiculaire à la plaque holographique. (b) Dans un montage par réflexion, les franges sont parallèles à la plaque et forment plusieurs plans dans l'épaisseur du support photosensible. Après blanchiment et développement, ces plans forment un réseau de Bragg dans l'hologramme.

constructive aussi : l'hologramme change de couleur.

C'est ainsi qu'on peut voir des hologrammes par réflexion de la lumière blanche sur les billets de banques par exemple.

Il est possible d'enregistrer l'hologramme en couleurs : en fait on enregistre trois hologrammes sur la même plaque avec trois longueurs d'onde différentes (rouge, vert, bleu). On a alors trois réseaux de Bragg superposés et sous éclairage en lumière blanche trois longueurs d'ondes interfèrent constructivement. On voit alors l'hologramme en couleurs.

5 Applications de l'holographie

L'holographie par réflexion est très utilisée pour réaliser des images 3D artistiques, ou des reproductions d'objets fragiles qu'on ne peut pas exposer au public. Elle est aussi employée pour les loisirs et la publicité.

Elle joue un rôle dans la protection contre la contrefaçon (billets de banque, carte de crédit, passeports, CDs etc...)

L'holographie autre que par réflexion était utilisée à la place de l'interférométrie de speckle pour mesurer des petits déplacements ou déformations d'un objet.

L'holographie numérique se développe, avec les applications qu'on a déjà mentionné.

Au lieu d'enregistrer des hologrammes sur une plaque, on peut envisager d'enregistrer plusieurs hologrammes dans un volume constitué par un cristal photoréfractif. Si on enregistre des hologrammes d'objets contenant de l'information binaire, on peut stocker énormément d'information. Pour distinguer tous ces hologrammes, il faut faire varier un paramètre d'enregistrement : longueur d'onde, angle d'inclinaison ... On peut ainsi stocker jusqu'à 10^{14} bits/cm³. C'est une mémoire holographique de capacité de stockage supérieure à celle d'un DVD.

Avec une telle mémoire, on peut envisager de stocker des images et de les lire une par une, projetant ainsi un film en 3D. Mais ce n'est pas pour demain.