

Introduction à l'holographie

par Benoît de PREVILLE
1180 Wien - Autriche

RÉSUMÉ

L'holographie permet d'obtenir des images en trois dimensions, contrairement à la photographie classique. Ceci n'est possible que si l'on enregistre la phase de l'onde lumineuse qui a éclairé l'objet. Pour y avoir accès on utilise le phénomène d'interférences entre une onde issue de l'objet et une onde de référence, toutes deux devant être cohérentes, ce qui exige l'emploi d'une même source très cohérente : le laser. On visualise alors une image virtuelle en relief lors de la reconstruction de l'onde objet. Une double exposition donne accès à une étude très fine de déformation : c'est l'interférométrie holographique.

1. NAISSANCE DE L'HOLOGRAPHIE

Monde en trois dimensions $\xrightarrow{\text{technologie photographique habituelle}}$ *Image en deux dimensions*

Pourquoi ? L'image est un enregistrement point par point de l'intensité, or :

$$\text{Intensité} = (\text{amplitude réelle de l'onde optique issue de l'objet})^2$$

toute l'information sur la phase de l'onde issue de l'objet est perdue.

Première idée

Notre œil, comme les émulsions photographiques, n'est sensible qu'à l'intensité des ondes reçues, et pourtant nous voyons en relief : nous avons deux yeux ! A partir de ce constat, C. Wheatstone invente le stéréogramme dès 1833. Il est modifié par D. Brewster qui réalise en 1847 la superposition visuelle, grâce à deux demi-lentilles, de deux images. Les stéréogrammes sont encore largement utilisés, en photogrammétrie, en cartographie à partir de reconnaissances aériennes, ... Actuellement, des recherches sur la physiologie et la psychologie de la vision ont fait évoluer les stéréogrammes vers des images «gémellaires» faites de points aléatoirement répartis, fondus en une seule image : celles-ci sont commercialisées en grand nombre.

Nouvelle idée

En 1947, Dennis Gabor (physicien anglais) utilise le phénomène d'interférence sachant qu'il permet d'avoir une information sur la phase en plus de l'information sur

l'amplitude : il réalise alors le premier hologramme (*holos (grec) → entier*) en faisant interférer une onde issue de l'objet à photographier avec une onde de référence. Cela lui vaut le Prix Nobel en 1971.

L'avènement de ce système a été rendu possible grâce à l'utilisation de la lumière laser, ainsi les premiers hologrammes obtenus à l'aide d'un laser ont été conçus en 1962 par E. Leith et J. Upatnieks. La lumière laser offre l'avantage d'être très cohérente (la longueur de cohérence d'un laser He-Ne est de l'ordre de 30 cm alors que celle d'une source classique ne dépasse pas quelques dixièmes de mm) ; elle est également très intense à la sortie du laser, mais son éclairement est fortement réduit par l'élargissement très important du faisceau que l'on doit réaliser afin d'obtenir une tache de l'ordre de 10 cm de diamètre qui puisse éclairer l'ensemble de l'objet : l'éclairement passe alors de 10^4 W/m^2 à environ $0,5 \text{ W/m}^2$.

2. ENREGISTREMENT D'UN HOLOGRAMME

Principe

Division du faisceau laser en un faisceau pour l'objet et un faisceau de référence : ces deux ondes étant cohérentes, elles interfèrent.

Dispositif simplifié pour un objet ponctuel

Le montage, dit «à référence inclinée», a été mis au point par Leith en 1962. Il est schématisé sur la figure 1, où :

- Σ_1 : surface d'onde de l'onde issue de l'objet (l'objet étant ponctuel, elle est sphérique),
- Σ_r : surface d'onde de l'onde de référence issue du prisme.

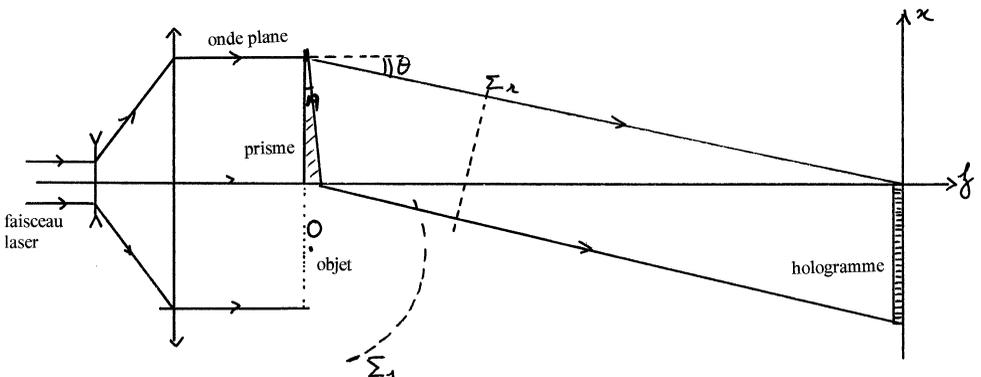


Figure 1 : Dispositif d'enregistrement à référence inclinée.

L'angle de déviation à la sortie du prisme d'angle au sommet A (très petit) et d'indice de réfraction n vérifie : $\theta \approx (n - 1) A$.

Intensité lumineuse I reçue par l'hologramme

Appelons :

- Ψ_1 : l'amplitude complexe de l'onde issue de l'objet,
- Ψ_r : l'amplitude complexe de l'onde de référence,
- Ψ : l'amplitude complexe de l'onde reçue par l'hologramme ; alors :

$$I = \Psi \Psi^* = (\Psi_1 + \Psi_r) (\Psi_1^* + \Psi_r^*) = I_1 + I_r + \Psi_1 \Psi_r^* + \Psi_1^* \Psi_r$$

En (x,y) dans le plan d'incidence :

$$\Psi_r = A_r e^{i\varphi_r}$$

où :

$$\varphi_r = \vec{k} \cdot \vec{r}$$

avec :

$$\vec{k} = k \cos \theta \vec{e}_z - k \sin \theta \vec{e}_x \quad ; \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\Rightarrow \Psi_r = A_r e^{-i 2\pi \frac{x \sin \theta}{\lambda}}$$

$$\Psi_1 = A_1 e^{i\varphi_1}$$

où :

$$A_1 = A_1(x, y) \quad ; \quad \varphi_1 = \varphi_1(x, y)$$

$$\Rightarrow I = I_1 + I_r + 2 \sqrt{I_1 I_r} \cos \left(\varphi_1 + 2\pi \frac{x \sin \theta}{\lambda} \right)$$

La plaque photographique recevant I est appelée hologramme : elle est le siège d'interférences très serrées, d'où son aspect grisâtre.

Précautions importantes

- Si $\lambda = 632,8$ nm (laser He-Ne) et $\theta = 5^\circ$ alors la période des franges d'interférence est : $p = \frac{\lambda}{\sin \theta} \approx 7,3$ μm .

On comprend immédiatement la nécessité d'un grain très fin : un hologramme doit pouvoir séparer 2000 traits/mm, contre 100 pour une pellicule normale. Ce type de plaque est peu sensible : il nécessite un temps d'exposition d'environ 10 s.

- Le calcul de l'interfrange p met également en évidence la nécessité d'un montage extrêmement stable mécaniquement afin d'obtenir un enregistrement précis.

Dispositif d'enregistrement holographique d'un objet

Il est représenté sur la figure 2, de façon plus réelle cette fois-ci, puisque l'objet n'est plus ponctuel.

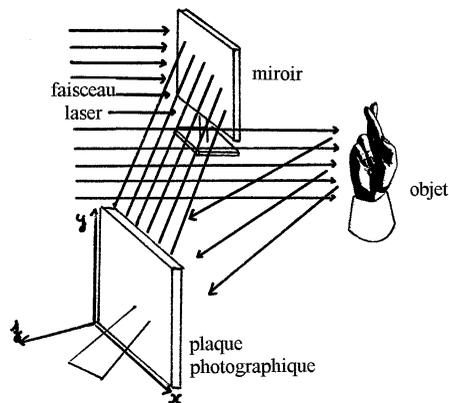


Figure 2 : Dispositif d'enregistrement holographique.

L'hologramme est donc une figure d'interférence produite par la superposition :

- d'ondes élémentaires issues de chaque point d'un objet éclairé,
- de l'onde de référence issue du même faisceau laser.

L'information relative à chaque point de l'objet étant répandue sur la totalité de l'hologramme, un simple morceau d'hologramme peut reproduire l'objet au complet, avec une moins bonne résolution.

3. RECONSTRUCTION DE L'ONDE OBJET

Principe

L'hologramme est illuminé par une onde de restitution qui doit être issue d'une source cohérente (cette condition est ici beaucoup moins contraignante que celle concernant

l'onde objet), il est alors utilisé comme objet de diffraction comme l'indique la figure 3. Afin de comprendre le phénomène utilisé, il faut voir la plaque d'hologramme - plus communément appelée hologramme - comme un réseau fabriqué à partir des interférences entre deux ondes. Simplement, alors qu'il est possible d'observer plusieurs ordres de diffraction avec un réseau, ici - les franges ayant un profil sinusoidal - seuls l'ordre «zéro» et le premier ordre sont observés dans la majorité des cas. On s'aperçoit que l'onde semble diverger du point objet, ce qui permet de reconstituer les ondes sphériques initiales.

Dispositif pour un objet ponctuel

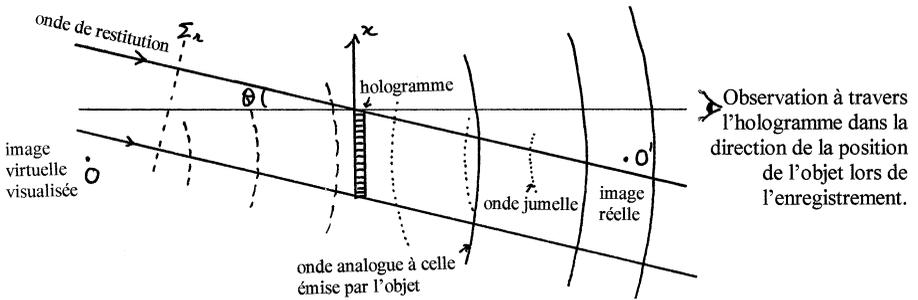


Figure 3 : Dispositif de reconstitution d'un objet ponctuel.

Intensité lumineuse transmise par l'hologramme

Si les conditions d'illumination lors de l'enregistrement et le traitement chimique de l'émulsion photographique au cours du développement sont telles que la transmittance en amplitude de l'hologramme vérifie : $t = a + bI$, alors en éclairant l'hologramme avec une onde analogue à l'onde de référence on obtient une onde émergente d'amplitude :

$$t\Psi_r = \left(a + b \left(I_1 + I_r + \Psi_1\Psi_r^* + \Psi_1^*\Psi_r \right) \right) \Psi_r$$

$$\Rightarrow t\Psi_r = \underline{(a + bI_r)\Psi_r} \quad + \quad bI_1\Psi_r \quad + \quad b|\Psi_r|^2\Psi_1 \quad + \quad b\Psi_r^2\Psi_1^*$$

onde proportionnelle à l'onde de référence: directement transmise

confondu avec la précédente dans ce modèle simple. Souvent négligée car $A_1 \ll A_r$

onde analogue à l'onde objet

« onde jumelle » donnant une image conjuguée. réelle dans le cas présent

L'onde d'éclairage, encore appelée onde de restitution (plane sur le dessin), est inclinée puisque l'onde de référence l'était et qu'elles doivent coïncider. Mais si l'onde de référence était «en ligne» lors de l'enregistrement, il serait impossible de séparer les différentes images lors de la lecture. C'est précisément ce qui contraignit Gabor à abandonner ses expériences d'holographie, vu que les sources de lumière dont il disposait ne lui permettaient pas d'opérer avec des ondes inclinées.

Dispositif de reconstruction holographique d'un objet

Il est visualisé sur la figure 4 où l'objet n'est cette fois-ci plus ponctuel, tout l'intérêt d'une telle méthode étant de photographier des objets ayant un volume !

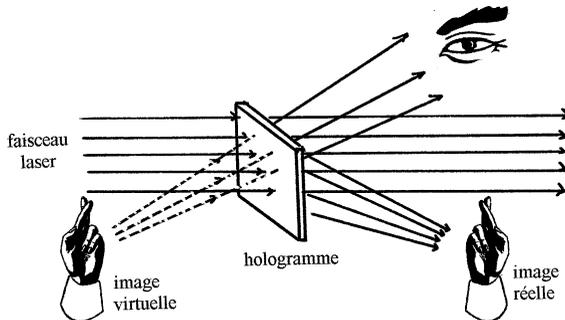


Figure 4 : Dispositif de reconstruction holographique.

Remarque

Il est possible d'effectuer une reconstruction holographique d'un objet à l'aide d'une autre longueur d'onde que celle utilisée lors de l'enregistrement, à la condition que l'onde lumineuse soit cohérente.

Or nous savons que les réseaux par transmission vérifient la relation fondamentale : $a(\sin \theta - \sin \theta_0) = m\lambda$, où a est le pas du réseau, θ et θ_0 les angles que font les rayons incidents et diffractés avec la normale au réseau, m l'ordre des franges observées (ici $m = 1$) et λ la longueur d'onde utilisée. Donc, a et θ_0 étant fixés, $\sin \theta$ évolue proportionnellement à λ : la taille de l'objet virtuel va varier selon la longueur d'onde du faisceau utilisé pour la restitution de l'objet.

4. CAS PARTICULIER DES HOLOGRAMMES EN LUMIÈRE BLANCHE

Le type d'hologramme vu jusqu'ici représente les hologrammes par transmission : ils sont utilisés en lumière transmise lors de la restitution. Il existe aussi des **hologrammes par réflexion**, réalisés dès 1962 par Y.N. Denisyuk et dont le principe est schématisé figure 2. Les ondes objet et référence arrivent de part et d'autre de l'émulsion, créant ainsi des paraboloïdes de révolution sur lesquelles l'état d'interférence est le même. En première approximation elles sont assimilées à des plans d'interférence parallèles à la surface de la plaque et distants de $\lambda/2$. On forme alors un hologramme en volume, semblable à un cristal : il ne diffracte de façon satisfaisante que si la condition de Bragg est vérifiée :

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

Par conséquent chaque longueur d'onde produit une image pour un angle particulier, c'est pourquoi la couleur change lorsque l'angle change ! Ceci est rendu possible par l'ordre de grandeur de la longueur de cohérence de la lumière blanche : de l'ordre du dixième de millimètre, elle est supérieure à l'épaisseur de la plaque (~ centième de mm). Le mécanisme est celui des ondes multiples par réflexion, utilisé par exemple par Lippmann pour ses photographies en couleurs.

Ce principe s'applique à l'enregistrement de mémoires holographiques, où l'information est stockée dans des cristaux de niobate de lithium. Nous n'avons plus alors un enregistrement dans deux dimensions, mais dans trois, permettant de stocker des milliards d'octets par disque de mémoire !

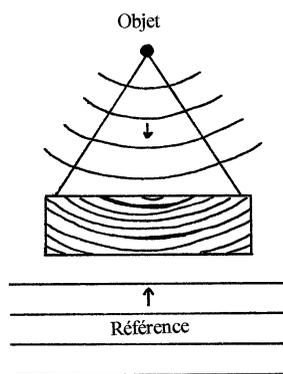


Figure 5 : Enregistrement d'un hologramme en lumière blanche.

5. L'INTERFÉROMÉTRIE HOLOGRAPHIQUE À DOUBLE EXPOSITION

Elle consiste à réaliser deux enregistrements holographiques sur le même plan : les deux images produisent une figure d'interférence révélant l'endroit où l'objet a été déformé, tel que le montre par exemple la figure 6.

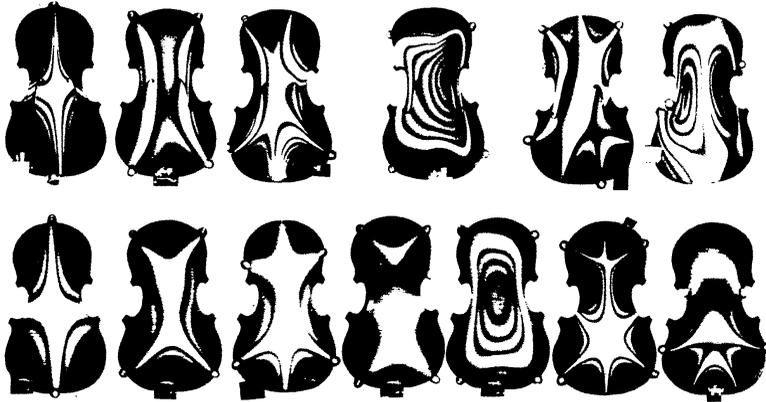


Figure 6 : Différents modes de vibration des faces avant et arrière d'un violon révélés par interférométrie holographique*.

On peut donc, par exemple, étudier les modes de vibration d'un violon. Cette méthode est également utilisée en aérodynamique : on détecte de cette manière les ondes de choc et les turbulences grâce aux variations de la densité de l'air.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. BENSON : «*Physique III*» (ondes, optique et physique moderne) - Édition ERPI (Québec) - 1991.
- [2] M. FRANÇON : «*Holographie*» (2e édition) - 1987 - Masson, Paris.
- [3] J. FRISBY : «*De l'œil à la vision*» - 1981 - Nathan, Paris.
- [4] HECHT : «*Optics*» - Édition Addison-Wesley - © 1987 - 1974 (2^e édition : mai 1990).
- [5] J.-Ph. PEREZ : «*Optique*» (3^e édition) - 1991 - Édition Masson.
- [6] P. SMIGIELSKI : «*Holographie industrielle*» - 1994 - Teknea, Toulouse.

* H. BENSON : «*Physique III*» ; référence [1], avec l'aimable autorisation de l'éditeur.