

Projet de TP : Holographie et interférométrie holographique

Romain MARI, Julien SALORT

Second semestre 2004-2005

Remerciements

Nous tenons à remercier Jérôme CAVORET pour son aide technique (fabrication de supports et de fixations) et pour son assistance pour les photos ainsi qu'Amélie NÉEL pour le matériel du club photo.

Table des matières

1	Montage lumière cohérente	2
1.1	Principe du montage	2
1.2	Mise en œuvre	2
1.2.1	Montage optique	2
1.2.2	Film polaroid	3
1.2.3	Plaque photosensible	3
1.3	Observation de l'hologramme	4
2	Montage lumière blanche	4
2.1	Principe du montage	4
2.2	Mise en œuvre	5
2.2.1	Montage optique	5
2.2.2	Temps d'exposition	5
2.3	Observation de l'hologramme	5
3	Interférométrie holographique	6
3.1	Principe	6
3.2	Canette déformée par un étau	6
3.3	Canette déformée par une ficelle	6
3.3.1	Montage expérimental	7
3.3.2	Étude théorique	7
3.3.3	Observation des interférences	8
3.4	Canette déformée thermiquement	9
3.4.1	Étude théorique	9
3.4.2	Déformation par un sèche-cheveux	9
3.4.3	Déformation par plaque chauffante	9

Introduction

Le but du TP est dans un premier temps de mettre en pratique le cours d'optique sur l'holographie pour réaliser nous même des hologrammes (visibles en lumière cohérente ou en lumière blanche) puis d'utiliser des techniques holographiques pour étudier des déformations de matériaux.

1 Montage lumière cohérente

1.1 Principe du montage

Notre premier objectif a été de créer des hologrammes visibles en lumière cohérente. Il s'agit de diviser la lumière d'un laser en deux faisceaux : un premier faisceau, dit de référence, éclaire directement la plaque holographique, l'autre faisceau éclaire l'objet à holographier. L'onde de référence arrive sur la plaque avec un certain angle $\theta \neq 0$ (voir Fig 1).

Si on appelle (X, Y) le plan de la plaque, celle-ci reçoit donc une lumière $a_1(X, Y)$ issue de l'objet à holographier et une onde plane $\Phi_0 e^{ikX \sin \theta}$ issue du faisceau de référence, si bien que l'intensité enregistrée est $|a_1|^2 + |\Phi_0|^2 + a_1 \Phi_0^* e^{-ikX \sin \theta} + a_1^* \Phi_0 e^{ikX \sin \theta}$. La transparence obtenue sur la plaque est modélisée comme une fonction affine de l'intensité reçue : $T(X, Y) = T_0 - \alpha I$, si bien que la lumière transmise par la plaque éclairée par une onde plane sous incidence θ' est

$$\Phi(X, Y) = (T_0 - \alpha(|a_1|^2 + |\Phi_0|^2))\Phi_0 e^{ikX \sin \theta'} - \alpha a_1 \Phi_0 e^{ikX(\sin \theta' - \sin \theta)} - \alpha a_1^* \Phi_0 e^{ikX(\sin \theta' + \sin \theta)}$$

On observe donc une image dans trois directions différentes dont l'image virtuelle restituée dans la direction θ (voir Fig 2).

1.2 Mise en œuvre

1.2.1 Montage optique

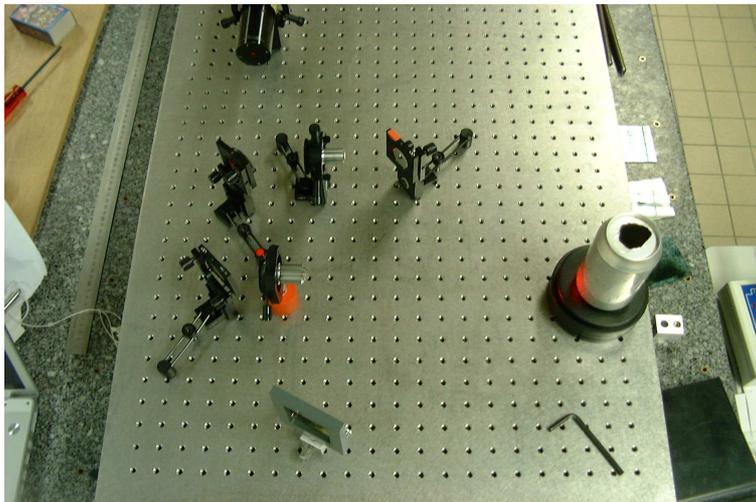


FIG. 1 – Montage pour créer un hologramme visible en lumière cohérente

Le montage optique en lui-même est réalisé sur une table en marbre afin d'absorber les vibrations. En effet, les mouvements de l'objet, même de quelques microns, peuvent perturber l'enregistrement (brouiller les interférences). Tous les composants optiques sont vissés sur la table. Nous avons deux lasers He-Ne à notre disposition, l'un de 1.2 mW et l'autre de 6.1 mW. L'objet holographié est un petit cygne blanc en plastique de quelques centimètres de hauteur et recouvert d'une peinture adaptée (très diffusante).

Le faisceau est séparé en deux faisceaux cohérents à l'aide d'une séparatrice 5 %. Au moment où la lumière arrive sur la plaque holographique, il faut que l'intensité provenant de l'objet soit inférieure au tiers de l'intensité du faisceau de référence.

Nous nous sommes posé la question de la nécessité d'un épurateur de faisceau afin d'obtenir une onde parfaitement plane en sortie du laser. Théoriquement, cela semble indispensable. En pratique, on a obtenu de meilleurs résultats sans l'épurateur qui ne faisait qu'augmenter les pertes de lumière (faisceau en sortie de l'épurateur plus large que les miroirs ou les lentilles). D'après [1], ce sont en réalité les objectifs de microscope que nous utilisons comme lentilles qui jouent le rôle d'épurateur de faisceau. Cela nous a laissé perplexe car si les objectifs de microscope comportent bien un trou et une lentille, il manque tout de même une lentille à l'entrée!

Nous avons eu quelques problèmes avec les fixations du laser, peu solides, qui rendaient difficiles le réglage et la stabilité du montage.

D'autre part, nous avons des difficultés à obtenir un faisceau laser propre. On pouvait toujours observer des taches de diffraction parasites lorsque nous illuminions un objet. Cela pouvait être dû à des poussières sur les lentilles et les miroirs ou à des réflexions multiples dans les objectifs de microscope. Nous avons donc décidé de nettoyer soigneusement les composants optiques à l'aide de lingettes mais cela n'a pas suffi.

1.2.2 Film polaroid

Au départ, nous avons à notre disposition un paquet de films « polaroid ». Nous les avons donc essayés. Nous pensions qu'il s'agissait d'un film photographique transparent et nous l'avons développé avec les produits utilisés usuellement pour les films photo. Ce fut un échec car d'une part ce type de film utilise visiblement une chimie différente des films photos (ce qui a d'ailleurs conduit à la dégradation des produits de révélation) et d'autre part, il ne s'agissait pas d'un film transparent (donc il n'est pas possible de l'éclairer par transmission).

1.2.3 Plaque photosensible

Nous avons également à notre disposition des plaques « holographiques ». Il s'agit de plaques de verre recouvertes d'une émulsion photosensible (avec un maximum d'absorption dans le rouge). Le fabricant n'indique pas les temps de pose. Au départ, nous n'avons pas non plus d'information sur les produits à utiliser pour le développement ou les temps nécessaires à la révélation et la fixation de l'émulsion.

De plus, les seules plaques dont nous disposions au début étaient déjà entamées et avaient dépassé la date de péremption de plus de trois ans. Nous avons néanmoins décidé de faire quelques essais avec. Nous cherchions dans un premier temps à déterminer les temps d'exposition et de révélation optimaux. Pour cela, nous avons utilisé un cache amovible placé devant la plaque photosensible. Ainsi, nous avons pu imprimer des bandes d'hologramme avec des temps de pose différents compris entre 10 s et 2 min.

Pour notre première tentative de développement, nous avons procédé comme pour des pellicules photo et avec les mêmes produits. Les plaques holographiques sont sorties absolument transparentes. Visiblement, les produits (Révélateur, Stop, Fixateur) ont simplement décapé la couche photosensible.

La semaine suivante, le département a reçu des plaques neuves et un révélateur adapté, le D-19 de Kodak. Le fabricant indique qu'il ne faut pas utiliser de bain stop mais qu'un fixateur de pellicules photo convient. En revanche, les temps de pose et les temps de révélation restent flous. Après avoir préparé la solution de révélateur dans un b cher de 3 L et avoir vérifié que la concentration du fixateur utilisé pour les films photo correspond bien à celle indiquée par le fabricant de plaques holographiques, nous essayons nos premiers développement avec D-19.

Nous développons plusieurs plaques avec plusieurs combinaisons de temps possibles. Nous déterminons qu'il faut 2 min dans le bain révélateur et 4 min dans le bain fixateur. Quant au temps d'exposition, il semble que 1 min 30 soit un bon compromis. Nous avons obtenu de bon résultats, y compris avec les plaques p rim es.

1.3 Observation de l'hologramme

En lumière incohérente, on ne voit que des figures d'interférence difficiles à interpréter. Il faut éclairer la plaque avec une lumière cohérente. Nous la regardons donc à travers un laser He-Ne muni d'une lentille pour élargir le faisceau (voir Fig. 2).

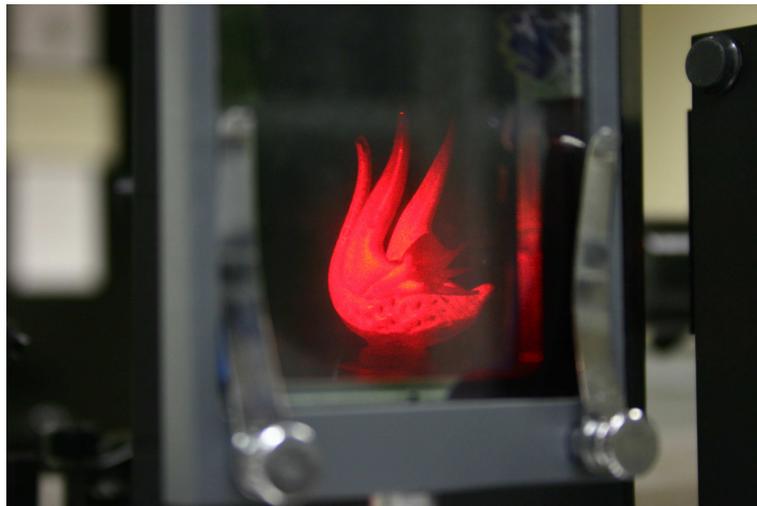


FIG. 2 – Observation d'un hologramme de cygne restitué en lumière laser

2 Montage lumière blanche

2.1 Principe du montage

Nous avons repris le montage présenté dans [1]. Il s'agit de placer l'objet à holographier juste derrière la plaque photo. L'onde incidente (plane) passe à travers la plaque holographique et interfère avec l'onde réfléchie par l'objet dans l'épaisseur de l'émulsion photographique. L'ordre de grandeur des interférences mises en jeu est bien plus faible de sorte que la longueur de cohérence de la lumière naturelle suffit à restituer l'image.

Le montage consiste ici simplement en un laser He-Ne muni d'un épurateur de faisceau, un élargisseur de faisceau (constitué de deux lentilles), la plaque holographie et l'objet collé à la plaque (voir Fig. 3). Nous utilisons une pièce de monnaie comme objet.

2.2 Mise en œuvre

2.2.1 Montage optique

Nous avons d'abord fait le montage sur la même table que pour le premier montage. Mais le faisceau lumineux restait très étroit à cause de la taille des lentilles utilisées. Nous n'arrivions pas à avoir une onde plane qui couvre totalement la pièce de monnaie. Nous avons essayé d'utiliser le laser 1,2 mW au lieu du laser 6 mW mais la luminosité était encore trop importante. Nous avons donc finalement opté pour un montage sur banc d'optique classique, ce qui a donné de bien meilleurs résultats (voir Fig. 3).



FIG. 3 – Montage pour obtenir un hologramme visible en lumière blanche

2.2.2 Temps d'exposition

Au départ, nous avons utilisé un temps de pose du même ordre de grandeur que pour le montage lumière cohérente, c'est-à-dire de l'ordre de la minute. Mais nous avons obtenu une tache noire inexploitable.

La lumière est bien plus concentrée avec ce montage qu'avec le premier. Ici, même après élargissement, le faisceau couvre à peine la pièce de monnaie alors qu'auparavant le faisceau était bien plus large (onde sphérique). Nous avons donc réduit le temps d'exposition aux environs de la seconde. C'était encore trop.

Nous nous sommes dit qu'il serait souhaitable d'avoir un moyen de quantifier le temps d'exposition. Nous avons donc décidé d'utiliser un diaphragme d'appareil photo afin d'exposer la plaque pendant une fraction de seconde bien déterminée. Ce ne fut pas très concluant. Il s'est avéré très difficile de placer dans le noir total l'appareil photo en face du laser si bien que la lumière passait finalement à côté.

Nous nous sommes donc contenté de retirer et remettre un cache devant le laser le plus rapidement possible, typiquement, le temps d'exposition était de l'ordre du quart de seconde.

2.3 Observation de l'hologramme

Au départ, nous pensions que nous avions échoué. Il n'y avait pas moyen de voir quoi que ce soit qui ressemble vaguement à une pièce de monnaie sur la plaque. Puis nous avons réalisé qu'il fallait placer un cache noir derrière la plaque holographique pour voir

apparaître la pièce. Apparemment, la lumière qui passait par transparence dominait et empêchait de voir l'image.

La pièce apparaît au milieu de reflets verts (voir Fig. 4).



FIG. 4 – Observation de l'hologramme d'une pièce de monnaie en lumière blanche

3 Interférométrie holographique

3.1 Principe

Il s'agit d'imprimer sur une même plaque holographique un objet et le même objet déformé. Lors de la restitution, les deux images interfèrent. Les franges d'interférences correspondent à un lieu de différence de marche constant, c'est-à-dire à une ligne de niveau de la déformation. Cela permet donc de voir la forme de la déformation et de quantifier son ordre de grandeur.

Nous avons travaillé avec une canette de 33 cL décapée (pour que le revêtement soit uniforme). Nous utilisons le montage lumière cohérente présenté que nous avons utilisé pour le cygne.

3.2 Canette déformée par un étau

Notre première idée a été de placer la canette dans un étau et d'appliquer une compression. Malheureusement, l'étau que nous avons à notre disposition était composé d'une mâchoire fixe et d'une mâchoire amovible. Cela se traduit par un déplacement, certes petit, de la canette lors du serrage. De plus, la contrainte appliquée n'est pas facilement quantifiable.

Ce premier essai fut donc un échec.

3.3 Canette déformée par une ficelle

Cette fois il s'agit de comprimer la canette à l'aide d'une ficelle.

3.3.1 Montage expérimental

Notre premier montage était constitué de deux tiges métalliques fixées sur la table optique. On attachait une ficelle à ces deux tiges. Nous faisons alors une exposition en présence de la contrainte puis une exposition sans contrainte. Comme il fallait supprimer la contrainte sans faire bouger la canette, nous avons d'abord décidé de brûler la ficelle. Comme cela introduisait trop de lumière parasite, nous avons également testé en coupant la ficelle avec une paire de ciseaux.

Le problème de ce système est qu'il ne permet pas de quantifier ou de faire varier précisément la contrainte appliquée, ce qui conduisait à des déformations trop grandes pour obtenir des franges visibles.

Nous avons finalement décidé d'utiliser une poulie et de suspendre des masses à l'une des extrémités de la ficelle (voir Fig. 5). Nous avons deux masses, l'une de 200 g et l'autre de 100 g. Nous avons fait une première impression de la canette sur la plaque holographique avec une masse de 200 g attachée à la ficelle et nous avons ajouté la masse de 100 g avant de réexposer la plaque. Ainsi, on mesure la déformation créée par une force $mg = 0,98 \text{ N}$.



FIG. 5 – Système de contrainte de la canette avec poulie

3.3.2 Étude théorique

Il s'agit d'estimer les déformations d'une canette soumise à une force F de la part d'une ficelle de diamètre d . La canette est constituée d'aluminium de module de YOUNG $E = 69 \text{ GPa}$. On la modélise comme un cylindre creux d'épaisseur e , de rayon r et de hauteur h .

Pour calculer la déformation, on déroule la canette (voir Fig. 6). On obtient ainsi un parallélépipède de longueur $2\pi r$, de hauteur h et d'épaisseur e que l'on étire dans le sens de la longueur.

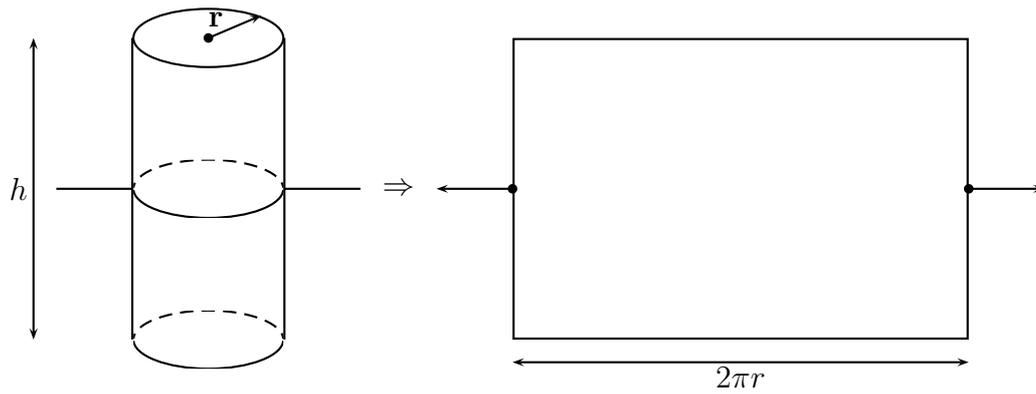


FIG. 6 – Idéalisation de la canette

La surface de la canette déroulée sur laquelle s'effectue la contrainte est ed d'où une contrainte $\sigma = \frac{mg}{ed}$. La déformation vaut $\varepsilon = \frac{\Delta r}{r}$. On utilise la loi de HOOKE : $\sigma = E\varepsilon$ d'où

$$\Delta r = \frac{rmg}{eEd}$$

Nous avons mesuré l'épaisseur e de la canette et le diamètre d de la ficelle à l'aide d'un micro-mètre. Nous avons trouvé : $e = 0,2$ mm et $d = 0,85$ mm. D'où : $\Delta r = 2,7$ μm .

3.3.3 Observation des interférences

Lors de l'observation de l'enregistrement holographique, on voit la canette recouverte de figures d'interférences (voir Fig. 7).

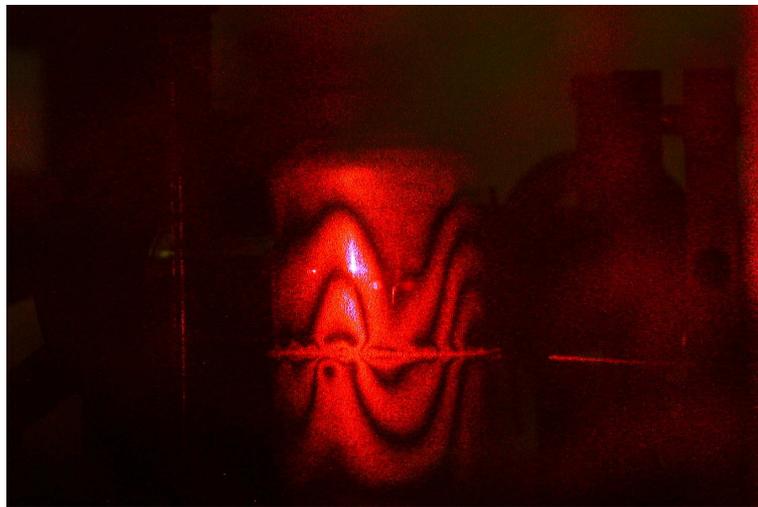


FIG. 7 – Interférométrie holographique pour une canette déformée par une ficelle

Sur la figure 7, on observe nettement quatre franges d'interférences, ce qui traduit une différence de marche de $\delta = 4\lambda$ soit $2,5$ μm , ce qui correspond bien à l'ordre de grandeur calculé en 3.3.2.

3.4 Canette déformée thermiquement

Il s'agit de chauffer la canette et d'observer les interférences dues à la dilatation de la canette. On travail toujours le montage lumière cohérente.

3.4.1 Étude théorique

On note α le coefficient de dilatation thermique linéaire et L la distance entre deux points donnés de la canette, c'est-à-dire :

$$\alpha = \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T}$$

Si on note $L_{T'}$ la longueur de la canette déroulée à la température T' et L_T la longueur à la température T , on obtient alors :

$$L_{T'} = L_T (1 + \alpha \Delta T)$$

Application numérique : pour $r_T = 3,25$ cm, $\alpha = 23,2 \cdot 10^{-6}$ K⁻¹ et $\Delta T = 30$ K :
 $\Delta r = 22 \mu\text{m} = 35\lambda$

3.4.2 Déformation par un sèche-cheveux

Protocol expérimental Nous réalisons une première exposition de l'objet non déformé. Nous chauffons la canette avec un sèche-cheveux pendant 30 s puis nous réexposons la plaque. L'ennui avec ce protocole c'est qu'il n'est pas possible de connaître précisément l'élévation de température.

Résultat On observe des franges circulaires concentriques qui se déplacent lorsque l'on change l'angle d'observation (voir Fig. 8).



FIG. 8 – Interférométrie holographique pour une canette déformée par un sèche-cheveux

3.4.3 Déformation par plaque chauffante

Nous avons également essayé d'utiliser une plaque chauffante. Ainsi nous pourrions savoir à quelle température nous avons chauffé la canette (en supposant que l'on connaît la température de la plaque à l'équilibre).

Malheureusement, nous nous sommes aperçu qu'il s'agissait d'un chauffage trop violent. On obtient des interférences complètement déformées, probablement à cause d'un gradient de température dans l'air (et donc d'un gradient d'indice).

Références

- [1] W. LAUTERBORN, T. KURZ, M. WIESENFELDT : *Optique cohérente, fondements et applications*
- [2] F. CHILLÀ : travaux dirigés d'optique de L3, 2004-2005, ENS Lyon