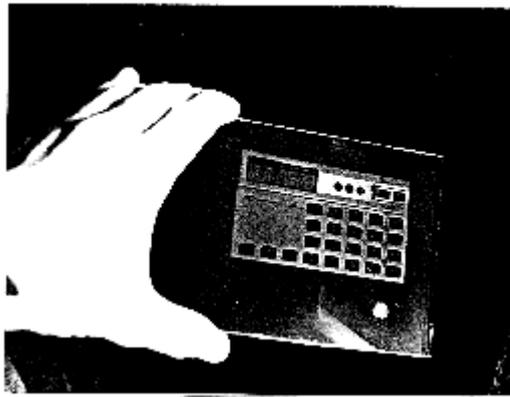


# TP OPTIQUE 1: HOLOGRAPHIE



**B. AMANA et J.-L. LEMAIRE**

## I - PARTIE THEORIQUE

Toute la partie théorique est extraite du livre HOLOGRAPHIE de M. FRANÇON, édition Masson (1987). Pour répondre aux questions posées on peut consulter ce livre et bien d'autres sur ce sujet à la bibliothèque de l'université.

### I-1 CONDITIONS D'UTILISATION D'UNE PLAQUE PHOTOGRAPHIQUE. AMPLITUDE TRANSMISE PAR UNE PLAQUE PHOTOGRAPHIQUE APRES DEVELOPPEMENT.

On donne ici un certain nombre de définitions concernant les propriétés d'une plaque photographique "idéale" convenablement développée. Une plaque photographique a été impressionnée. Après développement, le négatif est éclairé par une onde plane d'intensité  $I_0$ , sous incidence normale.

- le facteur de transmission en intensité est défini par :

$$T(x, y) = \frac{I(x, y)}{I_0} \quad (1)$$

où  $I(x, y)$  représente l'intensité transmise par le point  $M \begin{cases} x \\ y \end{cases}$  du négatif éclairé par l'onde d'intensité  $I_0$ . On a toujours  $T < 1$

- la densité  $D$  du négatif s'obtient par la relation suivante :

$$D = \text{Log} \frac{1}{T(x, y)} = \text{Log} \frac{1}{t^2(x, y)} \quad (2)$$

où  $t(x, y)$  désigne le coefficient de transmission en amplitude.

- on appelle "courbe de noircissement" la courbe donnant les variations de la densité  $D$  en fonction du logarithme de l'énergie  $W$  reçue par la plaque ( $W = I(x, y) \cdot \tau$ ) avec  $\tau$  temps de pose et  $I(x, y)$  l'intensité reçue par la plaque avant développement.

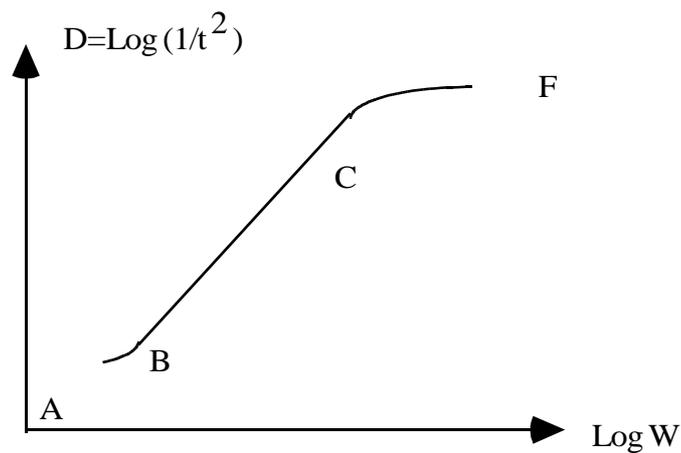


Figure I.1.

La courbe de noircissement possède une partie rectiligne BC de pente  $\gamma$  dite d'exposition normale, une partie AB correspondant à la sous-exposition et une partie CF de surexposition (Remarque: les phénomènes de solarisation ne sont pas représentés sur la courbe de la figure I.1).

Dans la région BC on a :

$$D = \gamma \text{Log} \frac{w}{w_0} \quad (4)$$

où  $W_0$  représente une constante.

Dans les expériences envisagées dans ce TP, la relation intéressante est celle qui existe entre l'amplitude  $t(x,y)$  transmise par le négatif et l'énergie reçue  $W(x,y)$  par la plaque avant développement.

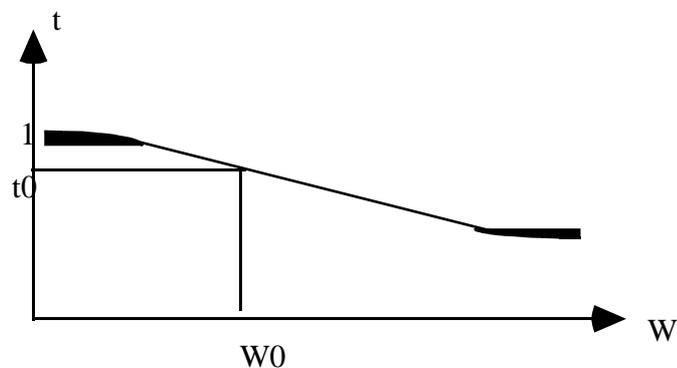


Figure I.2.

La courbe  $t = f(W)$  possède également une partie rectiligne de pente  $\beta$  correspondant à la région de sous-exposition de la courbe de noircissement. On supposera dans toute la suite que l'énergie moyenne  $W_0$  reçue par la plaque et que le contraste des objets photographiés sont suffisamment faibles pour que l'on puisse considérer que la plaque est utilisée dans ces conditions.

$$t(x,y) = t_0 - \beta (W(x,y) - W_0) \quad (5)$$

On supposera également que les grains de la plaque (plaque "idéale") sont infiniment fins, ce qui permet d'enregistrer des détails aussi petits qu'on le désire.

## **I-2 HOLOGRAPHIE**

La théorie de l'holographie fut développée par Dennis Gabor en 1947. L'invention du LASER donna une impulsion nouvelle à la recherche sur l'holographie à partir des années 60. En 1964, Leith et Upatnieks parvinrent à une amélioration sensible et spectaculaire en réalisant des hologrammes d'objets diffusants avec pour conséquence que tout objet peut être vu à travers chaque point de l'hologramme. Depuis 1964 les progrès en holographie ont été rapides et de nombreux chercheurs ont travaillé à l'amélioration des diverses techniques. Nous renvoyons le lecteur aux nombreux ouvrages spécialisés pour ces applications (imagerie tridimensionnelle - stockage optique d'informations - interférométrie holographique - composants optiques...).

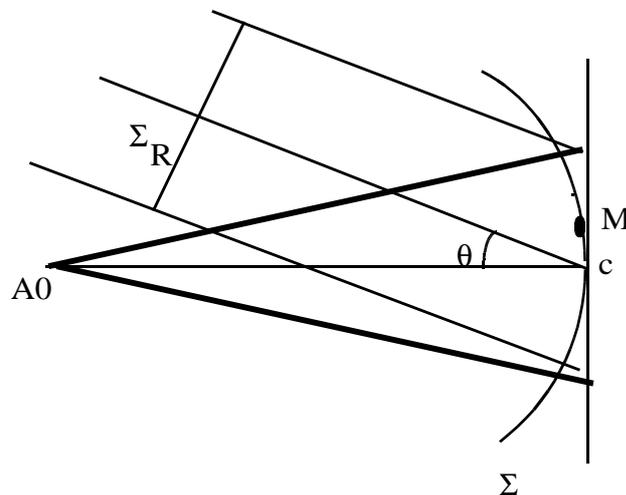
Un hologramme est l'enregistrement photographique des interférences produites entre un faisceau de référence cohérent et un faisceau objet.

On étudie ici le cas d'un fond cohérent incliné (hologramme type Leith et Upatnieks) séparé du faisceau objet.

La plaque photo reçoit la lumière diffusée par l'objet et le faisceau de référence (fond cohérent). Dans le cas présent la figure d'interférence est complexe et il est nécessaire que la plaque photographique soit capable d'enregistrer tous les détails: on utilisera donc une plaque très résolutive (plaque holographique) à grain très fin et donc à faible sensibilité (ce qui se traduit par un faible nombre ASA). Si  $G$  est la taille moyenne d'un grain, on montre que la condition sur l'angle des deux faisceaux interférant s'écrit  $\sin \Theta < \lambda / G$  compte tenu du grain très fin utilisé (Cf. les caractéristiques des plaques) cette condition n'est pas contraignante.

### a) Cas d'un objet ponctuel

Soit  $A_0$  une source ponctuelle monochromatique qui éclaire le plan  $\eta, \xi$  contenant la plaque photographique. Le point lumineux  $A_0$  constitue l'objet qui émet une onde sphérique. (faisceau objet)



En un point M situé à la distance  $\rho(\eta, \xi)$  du point O l'onde sphérique  $\Sigma$  a l'amplitude complexe:

$F(\eta, \xi) = b e^{-jk \frac{\rho^2}{2D}}$  où  $k$  est le vecteur d'onde,  $D$  la distance  $AO$  et  $b$  l'amplitude en O.

En effet, en prenant l'origine des phases en O,  $\frac{\rho^2}{2D}$  représente la différence de marche entre  $\Sigma$  et le plan de la plaque (au second ordre près).

Par ailleurs, l'onde plane cohérente  $\Sigma_R$  constitue le faisceau de référence d'amplitude  $a$ . Son amplitude de complexe en M vaut  $a e^{-jk\Theta\xi}$  (avec  $\Theta$  petit et  $\xi$  algébrique).

L'amplitude résultante en M s'écrit  $= a e^{-jk\Theta\xi} + F(\eta, \xi)$

1) Montrer que après développement de la plaque photographique l'amplitude transmise a pour expression:

$$t(x, y) = t_o - \beta\tau \left[ |F|^2 + a F e^{jk\xi\Theta} + a F^* e^{-jk\xi\Theta} \right]$$

- Observer un hologramme c'est observer la figure de diffraction de la plaque enregistrée en l'éclairant par la seule onde de référence.

On éclaire par une onde  $e^{-jk\theta\xi}$  de même orientation que celle qui a servi à l'enregistrement. L'amplitude transmise s'écrit alors :

$$te^{-jk\theta\xi} = (t_o - \beta\tau|F|^2)e^{-jk\theta\xi} - \beta\tau aF - \beta\tau aF^* e^{-jk2\theta\xi}$$

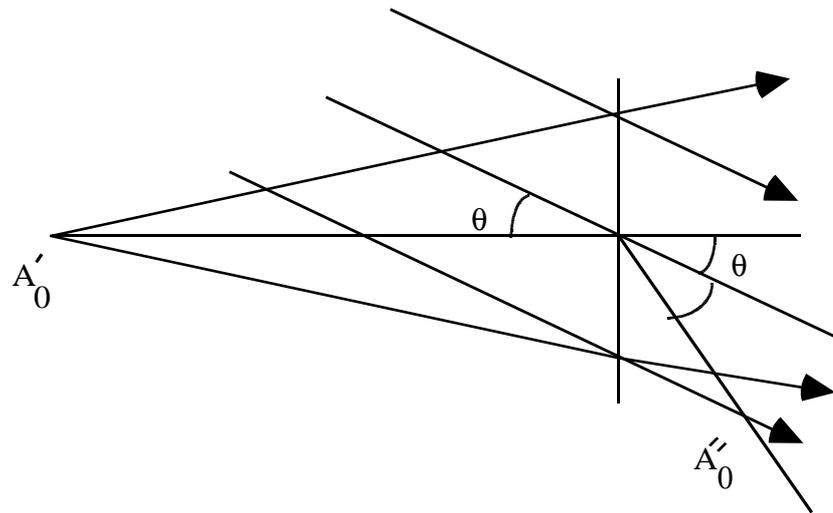


Figure I.3.

2) Identifier dans l'expression du second membre les termes correspondants:

- à une onde plane directement transmise
- à une onde sphérique divergente semblant provenir de  $A'_0$
- à une onde reconstituant une image réelle  $A''_0$ .

On voit donc que si l'hologramme est éclairé dans les mêmes conditions que lors de l'enregistrement, l'image virtuelle  $A'_0$  occupe par rapport au plan holographique la même position que "l'objet"  $A_0$ .

### **b) Cas d'un objet étendu :**

Un objet étendu, peut être considéré comme formé par un grand nombre de points lumineux. Si l'objet est éclairé par une source ponctuelle monochromatique, les points de l'objet se comportent à leur tour comme des sources ponctuelles d'amplitudes et de phases déterminées.

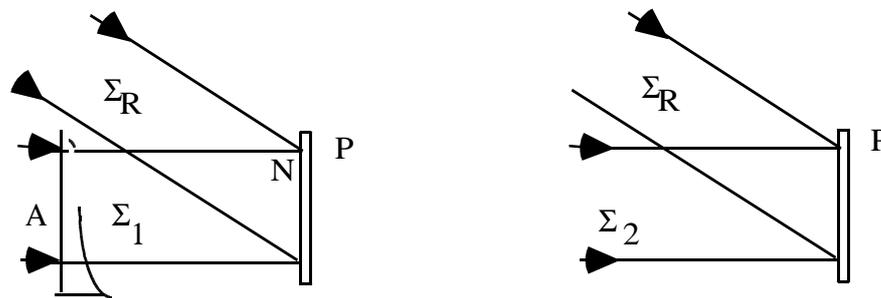
**N.B.** - On a étudié ici un hologramme type *Leit et Upatnieks*. Il existe d'autres types d'hologrammes que le lecteur pourra trouver dans les ouvrages

fondamentaux (hologramme de Gabor - de Fourier ainsi que les hologrammes "couleurs" ou encore hologrammes synthétiques (CAO).

### I-3 - INTERFEROMETRIE PAR HOLOGRAPHIE

Le but ici est de montrer qu'il est possible de faire interférer deux signaux pris à des instants différents.

Commençons par un cas très simple. Soit un objet transparent A éclairé en faisceau parallèle:



Première pose,  
l'objet déphasant A est  
en place.

Deuxième pose,  
l'objet est  
enlevé.

1) La plaque photographique P est éclairée par la lumière traversant A et par l'onde de référence  $\Sigma_R$  comme dans le cas du 1er T.P.(il s'agit donc de deux faisceaux issus d'une même source). Soit  $F_1(\eta, \xi)$  l'amplitude complexe de l'onde qui traverse A reçue en un point  $(\eta, \xi)$  de P. L'onde cohérente  $\Sigma_R$  produit au même point l'amplitude  $a(\eta, \xi)$ . La plaque reçoit donc une onde d'amplitude  $a+F_1$ .

1) Montrer que si on effectue une première pose d'une durée  $t_1$ , l'énergie reçue par la plaque vaut :  $w_1 = t_1 |a|^2 + t_1 a^* F_1 + t_1 a F_1^* + t_1 |F_1|^2$

2) Sans développer la plaque on effectue une 2ème pose sans l'objet A tout en gardant l'onde de référence  $\Sigma_R$ . La plaque reçoit alors les ondes  $\Sigma_2$  et  $\Sigma_R$ . Soit  $F_2(\eta, \xi)$  l'amplitude produit en un point  $(\eta, \xi)$  par  $\Sigma_2$ .

Si la 2ème pose est de durée  $t_2$ , quelle est alors l'énergie totale reçue par la plaque.

3) En se plaçant dans la région linéaire de la courbe  $T_n=f(W)$ , montrer qu'après développement, l'e facteur  $T_n$  transmis par la plaque vaut :

$$T_n = T_0 - \beta \left[ t_1 |F_1|^2 + t_2 |F_2|^2 + a^* (t_1 F_1 + t_2 F_2) + a(t_1 F_1^* + t_2 F_2^*) + (t_1 + t_2) |a|^2 \right]$$

Supposons que les deux temps de pose sont égaux :  $t_1 = t_2 = t$

$$T_n = T_0 - \beta t \left[ |F_1|^2 + |F_2|^2 + a^* (F_1 + F_2) + a(F_1^* + F_2^*) + 2|a|^2 \right]$$

Si on éclaire la plaque par une onde d'amplitude  $a(\eta, \xi)$ , le terme central entre crochets va reconstruire la somme  $t|F_1 + F_2|^2$  correspondant à l'interférence entre les images correspondantes. Si l'objet A est une lame d'épaisseur variable  $e$  et d'indice  $n$ , on observera les variations du chemin optique  $(n-1)e$ . Le fait important ici est qu'on a pu faire interférer deux ondes  $F_1$  et  $F_2$  alors qu'elles ont été enregistrées à des instants différents.

L'holographie permet d'étudier par interférométrie des objets diffusants, ce qui n'est pas possible avec les autres méthodes. Considérons un objet A quelconque, par exemple une canette de bière recouverte d'une peinture diffusante. Prenons l'hologramme de l'objet A. On fait une première exposition de l'objet. On déforme cet objet légèrement (A'). On enregistre sur la même plaque l'onde produite par A'.

A l'observation, l'hologramme restitue deux images. Ces deux images interfèrent et les franges d'interférence caractéristiques de la déformation apparaissent.

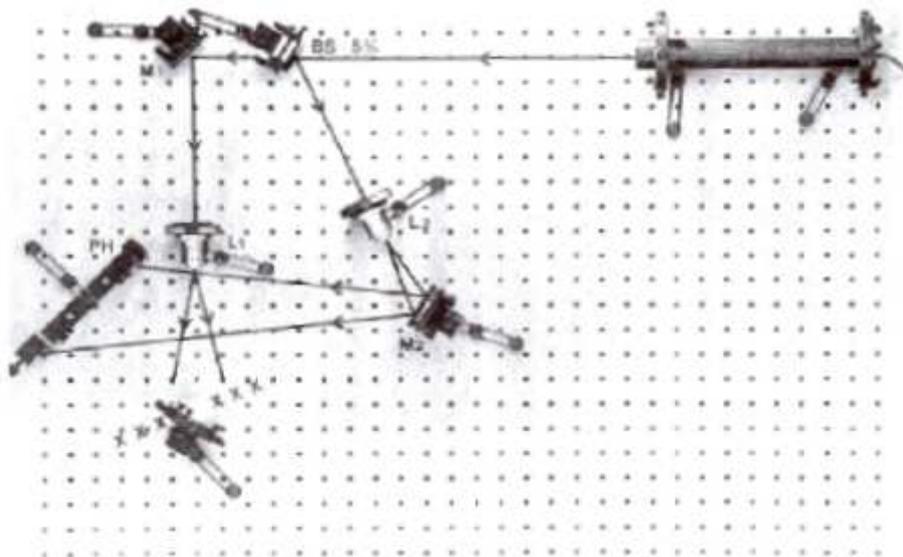
## II - PARTIE EXPERIMENTALE

Vous disposez d'un matériel "optique" fragile et coûteux. Manipulez avec attention et soin. Les deux types de laser Hélium-Néon mis à votre disposition ont des puissances de 0,8 et 7 mW .**Attention...** Ne jamais interposer son oeil sur le faisceau et prendre garde à la lumière diffusée.

### II-1 REALISATION EXPERIMENTALE D'UN HOLOGRAMME

On va réaliser l'enregistrement holographique d'un petit objet diffusant en l'éclairant suivant le montage optique ci-après:

- M1 et M2 miroirs de renvoi
- L'1 et L'2 sont des objectifs de microscopes à très courte focale; (compte tenu de la géométrie du système L'1 sera choisi de plus courte focale que L'2.
- BS-5% désigne une lame séparatrice de faisceau à 5% de réflexion
- PH support de plaque holographique.



### II-1.1 Procédure de Montage.

1- Monter les éléments selon le schéma en suivant la procédure de centrage donnée ci-après :

2- L'objet est positionné de telle sorte que la face visible (celle faisant face au porte-film) se situe sur les X indiqués sur le schéma. Pour les grands objets, les fixer directement sur la plate-forme avec quelques gouttes de colle. Pour les petits objets, prévoir un support.

3- Il existe 3 sortes de lames séparatrices de faisceaux BS (5%, 50%, et 100% réfléchissantes) pour les supports BS. Utilisez la lame 5% réfléchissante pour diviser le faisceau initial en deux faisceaux : le faisceau objet et le faisceau référence.

*Ne pas monter L'1 et L'2 pour l'instant*

Centrer le faisceau réfléchi utilisé comme référence au milieu du miroir M<sub>2</sub>.

4- Le faisceau réfléchi M<sub>2</sub> devra à son tour frapper le centre du porte-plaque (PH).

5. Ajuster le miroir M<sub>1</sub> pour que le faisceau frappe l'objet près de son centre pour avoir une divergence rapide du faisceau.

6. Positionner l'objectif L'1 au centre du faisceau laser pour faire diverger le faisceau. Positionner L'1 pour adapter la taille du faisceau à l'objet (plus proche pour les objets petits et plus loin pour les objets plus grands) et l'orienter pour couvrir tout l'objet.

7. Placer un carton blanc (de même taille que la plaque holographique) 6,35 x 6,35 cm<sup>2</sup> sur le porte plaque pour estimer à l'oeil la quantité de lumière réfléchie par l'objet qui atteint la plaque.

8. Utiliser l'objectif L'2 pour étendre le faisceau de référence. Déplacer L'2 en avant et en arrière jusqu'à obtenir une intensité de lumière de référence environ 2 à 3 fois plus importante que celle de la lumière réfléchie par l'objet.

9. Vérifier que les 2 chemins optiques sont quasiment les mêmes.

10. Eteindre toutes les lumières et mettre le cache en bas de la porte. Dans l'obscurité absolue, sortir la plaque du bocal, la placer sur son support sans toucher la face sensible ni aucun autre élément optique. La plaque est disposée

dans le bocal la face sensible dirigée vers le haut, l'orienter correctement sur son support, face sensible vers les faisceaux laser.

11. Exposer la plaque à la lumière laser pendant **1 minute** environ avec le laser 0,8 mW (Le choix du temps de pose sera fait avec l'enseignant et ajusté à vos conditions expérimentales). Toujours dans l'obscurité complète, retirer la plaque du support et la placer dans son bocal face sensible vers le haut, et bien fermer celui-ci. On peut alors rallumer la lumière dans la salle.

### **II-1.2 Développement des plaques holographiques**

- Révélateur 5 mn dans l'obscurité.
- Rinçage dans l'obscurité 1 mn
- Fixateur 4 mn dans l'obscurité
- Rinçage à l'eau courante (lumière en marche)
- Faire sécher la plaque

### **II-1.3. Observation de l'hologramme**

Placer de nouveau la plaque holographique sur son support, exactement à la place qu'elle avait pour l'exposition. Remplacer la lame 5% réfléchissante par la 100% réfléchissante pour ne conserver que le faisceau de référence.

Ajuster M<sub>2</sub> finement pour bien centrer le faisceau sur la plaque.

Retirer l'objet de son support et se placer derrière la plaque. Qu'observe-t-on en regardant à travers cette plaque dans la direction où était placé l'objet ? Faire varier l'angle d'observation en déplaçant son oeil. Que constatez-vous ?

Tourner maintenant légèrement la plaque et optimiser la position de l'oeil: qu'observe-t-on? Pourquoi doit-on regarder dans la direction où était placé l'objet?

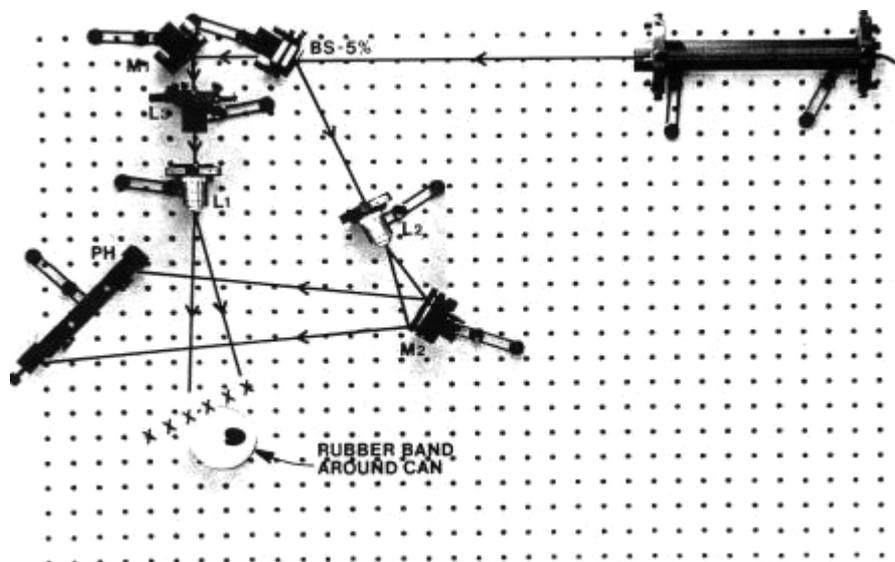
## **II-2 INTERFEROMETRIE SUR UN OBJET REFLECHISSANT.**

Nous allons voir ici que l'interféromètre holographique est une technique visuelle très impressionnante. Elle permet d'observer les très faibles déformations subies par un objet lorsque de faibles contraintes lui sont appliquées. La technique est extrêmement sensible, au point de permettre de relever des défauts dans la structure interne des objets telles que les fissures.

Cette expérience illustre le principe de base de l'interférométrie holographique: rendre apparente sur un objet toute déformation (même légère) de sa surface. Nous allons étudier la déformation d'une canette de bière comprimée par un ruban de plastique (ici du scotch) collé sur sa surface externe. Nous allons effectuer, ainsi qu'il est décrit dans la partie théorique, une double exposition holographique. L'observation de l'hologramme résultant montrera comment le ruban de scotch a déformé la canette de bière.

### II.2.1. Manipulation

#### Le montage à réaliser



1 - Faire le montage tel qu'il est indiqué sur la figure ci-dessus.

L1 et L2: objectifs de microscope.

L3: lentilles divergente;

M1 et m2: miroirs plans;

BS-5% ("beam splitter 5%"): lame 5% réfléchissante;

PH("plate holder"): porte-plaque holographique.

La face exposée de la canette doit se situer à 20 cm environ de la plaque

2 - La canette en aluminium (**qui ne doit pas bouger entre 2 poses**) est fixée à demeure sur la plate-forme.

3 - Réaliser un hologramme à double exposition d'une durée de 25 secondes par exposition. Avant la seconde exposition, coller avec précaution un mince ruban de scotch au milieu de la surface externe de la canette. Ceci doit être fait dans l'obscurité, sans toucher quoi que ce soit (ni la plaque, ni les objectifs ...).

Le ruban de scotch autour de la canette induit des contraintes qui entraînent à leur tour des déformations infinitésimales de la surface. Attendre quelques secondes avant la deuxième exposition pour que les contraintes soient entièrement relaxées.

Remarque: le temps de 25 secondes est indicatif, voir les consignes dans la salle en fonction de la plaque choisie et du laser utilisé.

## **II-2.2. Développement de la plaque**

### **Dans l'obscurité totale:**

- Révélateur 5 mn
- Rinçage
- Fixateur 4 mn

### **A la lumière**

- Rinçage 1 mn à l'eau courante (lumière en marche)
- Faire sécher la plaque

## **II-2.3. Observation de l'hologramme**

Placer ensuite à côté de la canette la plaque sur son support avec la face exposée tournée vers le laser.

Sur l'image holographique de la canette, on observe une figure formée de raies curvilignes et d'anneaux irréguliers appelées franges d'interférence. Ces franges traduisent les déformations subies par la surface de la canette entre la première et la 2ème exposition.

Le taux de déformation d'un point spécifique de la canette peut être déterminé par le nombre de franges comptées juste au-dessus de ce point en partant de la base de la canette.

Dire alors quelles sont les régions les plus déformées. Sachant que le passage d'une frange claire à une frange sombre ou l'inverse, représente un déplacement égal à  $\lambda/2$  (Cf. cours sur les interférences) soit  $3,210^{-4}$  mm avec un laser Hélium-Néon à 632,8 nm. Evaluer le plus grand déplacement subi par la surface de la canette.

En se déplaçant autour de la canette on peut dire que certaines régions sont bombées et d'autres rentrantes. Les identifier. Argumenter.

Bien qu'il soit plus démonstratif et spectaculaire pour observer le résultat de remplacer dans le montage précédent la canette par la plaque, pour des raisons de commodité, on garde la canette en place. On déplacera le laser et  $L_1$  pour avoir un faisceau de référence à côté de la canette.