

HOLOGRAPHIE

- BUTS:**
- Fabriquer un interféromètre de Michelson afin de mesurer précisément la longueur d'onde d'un laser He-Ne;
 - Estimer la longueur de cohérence de ce laser;
 - Réaliser des hologrammes de transmission et de réflexion.

1. INTRODUCTION

L'holographie est un domaine important de l'optique moderne. Les premiers hologrammes furent réalisés par D. Gabor en 1948. Ces derniers étaient de piètre qualité dû à la difficulté d'obtenir un fond lumineux cohérent. Depuis l'apparition du premier laser (1962), la réalisation d'hologrammes est maintenant chose facile. Plusieurs méthodes d'enregistrement ont depuis été développées et permettent d'obtenir des images tri-dimensionnelles de qualité remarquable. Quoique spectaculaire, la réalisation d'images tri-dimensionnelles n'est pas l'unique application de l'holographie. L'interférométrie a également bénéficié de cette nouvelle technologie et permet maintenant de faire interférer des ondes enregistrées à différents instants. Il est maintenant possible, par exemple, d'étudier les modes propres de vibrations de surfaces complexes.

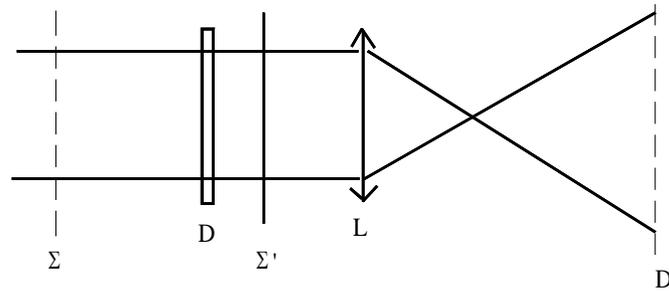
Dans cette expérience, vous étudierez les principes fondamentaux qui ont donné lieu à la découverte de l'holographie. Vous devrez vérifier quelques uns de ces principes en fabriquant, entre autres, un interféromètre de Michelson. Par la suite, vous devrez vous familiariser avec les techniques expérimentales permettant de réaliser vos propres hologrammes.

Votre étude débutera par la fabrication d'un interféromètre de Michelson. Vous l'utiliserez pour vérifier la stabilité de la table optique, pour mesurer la longueur d'onde du laser utilisé et évaluer sa longueur de cohérence. Par la suite, vous réaliserez des hologrammes de transmission et de réflexion à l'aide des montages suggérés.

2. THÉORIE

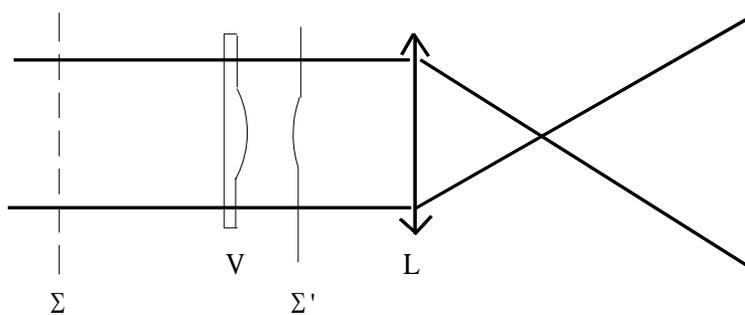
2.1 Amplitude et phase d'une onde lumineuse

Considérons le montage ci-dessous formé d'une onde incidente Σ , d'une diapositive D et d'une lentille L .

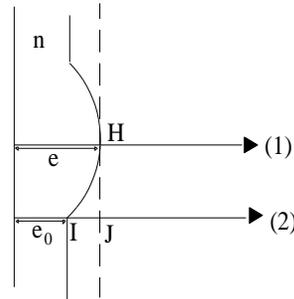


L'onde **plane** incidente Σ traverse la diapositive D contenant une image quelconque. À chaque point de l'onde transmise Σ' , correspond une amplitude qui dépend de la transparence de l'image contenue sur la diapositive. On dira que l'objet D est un « objet d'amplitude ». Lorsque l'on fabrique une image D' sur un écran, à chaque point de l'image formée sur l'écran correspond une amplitude égale à celle d'un point de l'objet D .

Remplaçons maintenant la diapositive par un objet transparent d'épaisseur variable.



L'Objet V est parfaitement transparent et possède un indice de réfraction n . En un point où l'épaisseur est e , on dira que la distance optique parcourue par le rayon (1) est ne . Celle parcourue par le rayon (2) dans l'objet est ne_0 .



Pour se rendre au point J , le rayon (2) parcourt en plus la distance $(e-e_0)n_{air} = (e-e_0)$. La différence des chemins optiques entre les rayons (1) et (2) est donc:

$$\delta = ne - [ne_0 + e - e_0] = (n-1)(e - e_0)$$

Si l'on éclaire l'objet V à l'aide d'une lumière monochromatique de longueur d'onde λ , aux variations de parcours δ correspondent des variations de phase données par:

$$\varphi = \frac{2\pi\delta}{\lambda}$$

Après avoir traversé l'objet, l'amplitude de l'onde reste inchangée mais l'image à Σ' est maintenant caractérisée par des variations de phase. On appelle « objet de phase » un objet qui modifie la phase de l'onde qui le traverse sans affecter son amplitude. L'image formée en V' à l'aide de la lentille L montre une amplitude égale en chaque point, seule la phase varie. Plusieurs méthodes existent afin de rendre visibles les variations de phase. Les deux plus connues sont l'interféromètre de Michelson et le contraste de phase.

2.2 Cohérence spatiale

Il existe deux notions de cohérence: la cohérence spatiale et la cohérence temporelle. Ces deux formes de cohérence sont essentielles pour réaliser des hologrammes. Imaginez que vous essayez de répéter l'expérience d'interférence des fentes de Young. Pour éclairer simultanément les deux fentes, vous devez utiliser une source ponctuelle. Pourquoi? Si vous tentez de remplacer la source ponctuelle par une source ayant une dimension finie appréciable, vous n'obtiendrez plus aucune frange d'interférence. Cela s'explique par le fait qu'à l'intérieur de la source, ce ne sont pas tous les atomes qui émettent de la lumière en même temps. Comme les atomes n'ont aucune relation de phase entre eux, l'émission de lumière est dite incohérente spatialement, ce qui ne permet pas d'obtenir un unique front d'onde d'amplitude et de phase bien définis à la sortie. On peut également montrer que les franges d'interférences obtenues à l'aide d'un interféromètre de Michelson disparaissent lorsqu'on utilise une source qui n'est plus ponctuelle¹.

2.3 Cohérence temporelle

¹ HOLOGRAPHIE. M. Françon, 2^e Ed. Masson. 1987. p. 7.

Nous savons que lorsque les atomes émettent de la lumière, ils le font sous forme de trains d'ondes. Il y a une relation qui existe entre la durée de ces trains d'ondes et leur composition spectrale. Plus un train d'onde est long, plus le domaine spectral couvert est restreint et inversement. Pour bien comprendre cette notion de cohérence spatiale, utilisons une fois de plus l'interféromètre de Michelson.

Si les deux faisceaux qui interfèrent ont subi une différence de parcours optique égale à $2e$, et que l'étendue des trains d'ondes est plus grande que $2e$, alors la superposition des ondes est possible et il y aura production du phénomène d'interférence. Par contre, si $2e$ est largement supérieure à l'étendue des trains d'ondes alors ces derniers se retrouvent l'un derrière l'autre et n'atteindront pas l'écran au même moment. Il ne pourra donc plus y avoir d'interférence. Il y a cependant des trains d'ondes qui se recouvrent à l'écran, mais ceux-ci ne proviennent pas du même train d'onde qui s'est fait divisé en deux par la séparatrice. Ils proviennent d'émissions qui n'ont pas eu lieu au même instant. Cela se produit lorsque l'on utilise une source ordinaire et que la différence de parcours optique $2e$ est grande. Comme l'émission de trains d'ondes par les atomes est aléatoire, il n'y aura aucune relation de phase entre les interférences produites par des trains d'ondes émis à des instants différents. Ceci fait qu'en moyenne nous ne pouvons observer d'interférence lorsque $2e$ est supérieur à la longueur de cohérence de la source.

2.4 Principe de l'enregistrement sur pellicule photographique

Supposons que l'on dispose d'un réseau produisant une transmission de la forme $\cos^2 x$. Nous voulons capter le faisceau transmis à l'aide d'un négatif et y obtenir une transparence qui suit la même loi en $\cos^2 x$. Appelons E l'éclairement reçu par la plaque photographique en passant par le réseau. Soit I_0 l'intensité incidente et I l'intensité transmise. Le facteur de transmission T est défini par:

$$T = \frac{I}{I_0}$$

On définit la densité optique du négatif D par l'équation suivante:

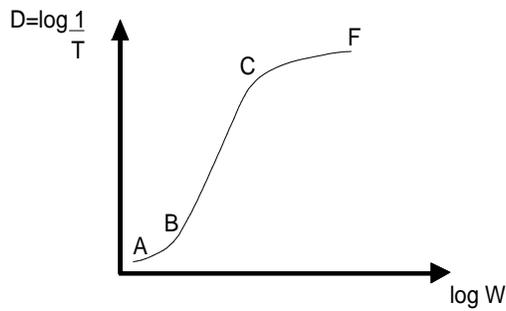
$$D = \log \frac{1}{T}$$

Si t est le coefficient de transmission en amplitude, alors:

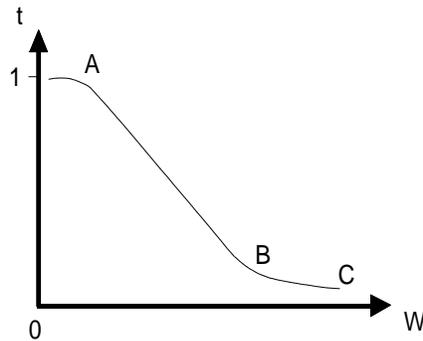
$$T = t^2 \quad \text{et} \quad D = \log \frac{1}{t^2}$$

Si E est l'éclairement et τ le temps de pose, la plaque reçoit l'énergie $W = E\tau$.

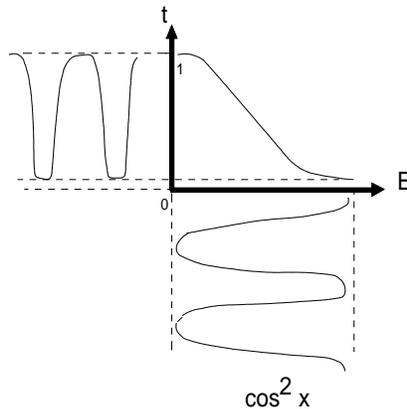
La figure suivante montre la courbe de noircissement (densité optique) de l'émulsion en fonction de l'énergie reçue.



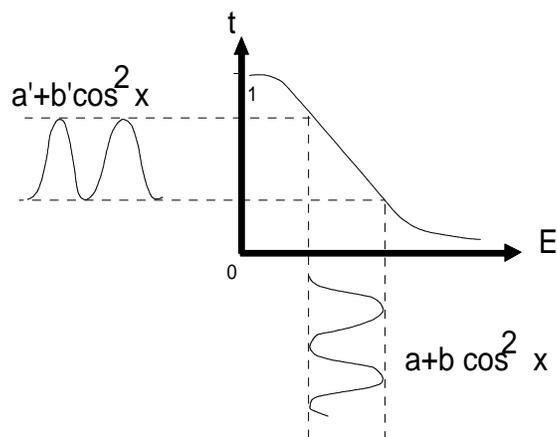
On remarque la présence d'une région rectiligne BC dite d'exposition normale. La région AB est celle de sous-exposition tandis que la région CF représente la surexposition. Pour notre problème, c'est la relation existant entre l'amplitude transmise et l'énergie W reçue qui nous intéresse. La courbe qui représente cette relation $t=f(W)$ est représentée ci-dessous:



On note que la partie rectiligne de $t=f(W)$ correspond à la région de sous-exposition. On peut continuer notre étude de la transmission du négatif en utilisant la courbe $t=f(E)$, qui a la même forme que $f(W)$. Nous avons mentionné que la plaque reçoit un éclairage de la forme $E = \cos^2 x$. Comme la fonction $t=f(E)$ n'est pas linéaire, la transmission ne pourra être de la forme $t = \cos^2 x$. La figure suivante montre le résultat attendu:



Le spectre de Fourier de la transmission résultante ne comportera donc pas uniquement une image directe et deux spectres comme dans le cas d'un réseau sinusoïdal car il y a des déformations importantes par rapport à la loi en $\cos^2 x$. Afin de reproduire fidèlement l'éclairement reçu, utilisons plutôt un éclairement de la forme $a+b\cos^2 x$. On supposera que l'amplitude minimale a et l'amplitude maximale $a+b$ se trouvent dans la partie rectiligne de $t=f(E)$. Dans ces conditions, l'amplitude transmise par le négatif sera de la forme $a'+b'\cos^2 x$.



L'image résultante produite par ce réseau sinusoïdal est tout simplement moins contrastée mais elle reproduit fidèlement la forme de l'éclairement reçu. Le spectre de Fourier de la résultante comporte bien une image directe et deux spectres. Vous verrez plus loin que l'on doit se servir de ce résultat pour ajuster correctement le rapport des intensités des faisceaux lasers qui serviront à produire les hologrammes.

2.5 Développement et blanchiment de la pellicule

Les émulsions photographiques utilisées en holographie ressemblent à celles utilisées normalement en photographie. Elles sont formées de grains d'halogénures d'argent, dont la taille est inférieure au micron, déposés sur une gélatine qui repose sur une plaque de verre ou un film de plastique. L'épaisseur totale de l'émulsion est d'environ 10 microns. Lorsque l'émulsion est exposée à la lumière, un photon est absorbé par chaque grain. Ensemble, les grains qui ont été exposés à la lumière forment ce que l'on appelle « l'image latente ». On procède ensuite au développement qui consiste en une réduction des grains d'halogénures d'argent exposés à la lumière en argent métallique. On place ensuite la pellicule dans un bain d'arrêt. Ce bain contient un acide qui neutralise l'effet du développeur. On pourrait immerger alors la pellicule dans le fixateur. Ce dernier aurait pour effet d'éliminer tous les cristaux d'halogénures d'argent qui n'ont pas été exposés à la lumière. Il fixe également en place, dans la gélatine, les grains d'argent métallique. Cette étape permet de conserver le négatif en bon état durant des années.

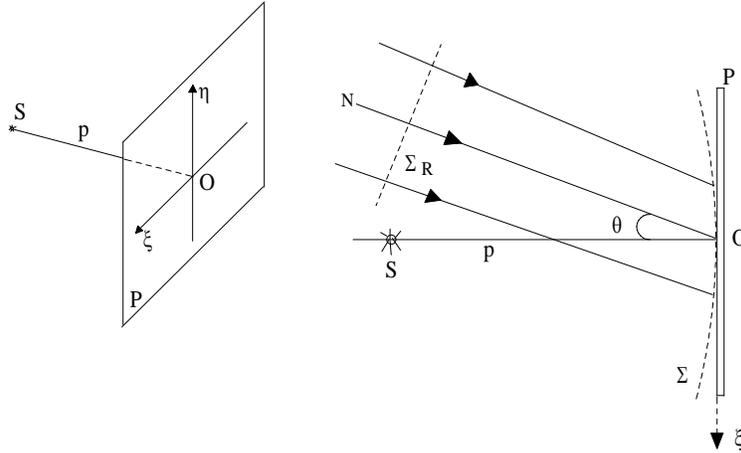
On peut également procéder au blanchiment de l'hologramme. Ce procédé consiste à immerger la pellicule dans une solution qui transformera les cristaux d'argent en sels transparents. On se retrouvera donc avec un hologramme de phase au lieu d'un hologramme d'amplitude. Le blanchiment permet généralement d'obtenir des hologrammes plus lumineux.

2.6 Enregistrement et visualisation d'hologrammes

Nous décrivons ici comment l'amplitude et la phase peuvent être enregistrées sur une pellicule photographique afin de former un hologramme. Soit S , une source ponctuelle qui éclaire le plan η, ξ contenant la pellicule photographique. Elle est située à la distance $p=SO$ de la pellicule. En plus de l'onde sphérique Σ issue de S , la pellicule reçoit une onde plane cohérente Σ_R . La normale NO à Σ_R fait un angle θ avec SO . L'onde sphérique issue de S donne en un point η, ξ de la pellicule l'amplitude complexe $F(\eta, \xi)$ et l'onde cohérente Σ_R l'amplitude $a(\eta, \xi)$. L'onde cohérente Σ_R donne un éclaircissement constant $|a^2|$ dans le plan de la pellicule et on posera:

$$a(\eta, \xi) = a_0 e^{-iK\theta\xi} \quad (1)$$

où $K = \frac{2\pi}{\lambda}$; λ étant la longueur d'onde de la lumière utilisée et a_0 une constante.



Au point η, ξ la pellicule reçoit l'amplitude:

$$a(\eta, \xi) + F(\eta, \xi) \quad (2)$$

et l'éclaircissement: $E = (a + F)(a^* + F^*) = |a^2| + |F^2| + a^* F + a F^*$ (3)

Les variations d'éclaircissement sur la pellicule sont dues aux interférences des ondes Σ et Σ_R . Avec un temps de pose égal à T , l'énergie reçue est:

$$W = ET = T|a^2| + T|F^2| + Ta^*F + TaF^* \quad (4)$$

La transmission du négatif sera donc proportionnelle à W à condition de se trouver dans la région linéaire de la courbe $t_N=f(W)$. Pour que cette condition soit réalisée, il faut que W ne s'écarte pas trop d'une valeur moyenne W_0 . Il est donc important que les franges d'interférence soient peu contrastées, c'est à dire que les amplitudes des deux ondes Σ et Σ_R soient différentes. Dans le cas où ces amplitudes sont identiques, on obtiendra des franges complètement noires ($E=0$). Cela nous conduit dans la région non-linéaire de la courbe de transmission. Si l'on réussit à se placer dans de bonnes conditions, l'amplitude transmise par le négatif sera de la forme:

$$t_N = t_0 - \beta(W - W_0) \quad (5)$$

avec W_0 qui représente la valeur moyenne de l'énergie reçue par rapport à laquelle W ne doit pas trop s'écartier. Lorsque $W=W_0$, on obtient l'amplitude t_0 . La pente de la courbe $t_N=f(W)$ dans la région linéaire est donnée par β . Posons:

$$W_0 = T|a|^2 \quad (6)$$

On peut alors réécrire t_N comme étant:

$$t_N = t_0 - \beta \left[T|F|^2 + Ta^*F + TaF^* \right] \quad (7)$$

et en posant $\beta' = \beta T$:

$$t_N = t_0 - \beta' \left[|F|^2 + a^*F + aF^* \right] \quad (8)$$

Ce sont les deux derniers termes entre crochets qui montrent que, grâce au fond cohérent Σ_R , l'amplitude et la phase de l'onde Σ qui sont contenues dans la fonction $F(\eta, \xi)$ émise par S seront enregistrées par la plaque photographique.

2.7 Reconstitution de l'image

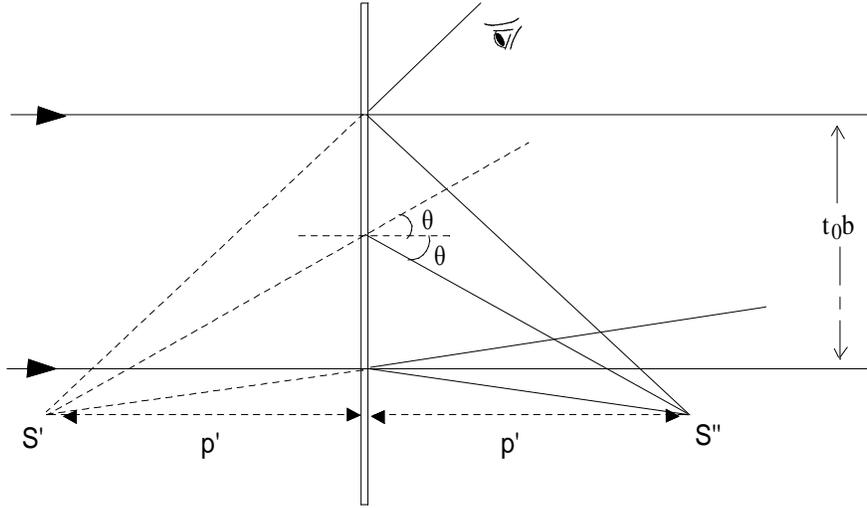
Il s'agit maintenant d'éclairer le négatif (hologramme) obtenu en (2.6) par une onde donnant en η, ξ l'amplitude complexe $b(\eta, \xi)$. L'amplitude transmise par l'hologramme sera:

$$b(\eta, \xi)t_N(\eta, \xi) = t_0b - b\beta' \left[|F|^2 + a^*F + aF^* \right] \quad (9)$$

Si l'onde de reconstitution est une onde plane uniforme et parallèle au plan de l'hologramme alors b est une constante. En explicitant $a(\eta, \xi)$ à l'aide de (1), on a:

$$bt_N = t_0b - b\beta'|F|^2 - b\beta'a_0Fe^{iK\theta\xi} - b\beta'a_0F^*e^{-iK\theta\xi} \quad (10)$$

Le terme t_0b représente l'onde plane de reconstitution à un facteur de phase près. C'est l'onde plane qui est directement transmise. Le second terme $b\beta'|F|^2$ correspond à une faible variation de la transparence par suite de la présence de $|F|^2$. Il donne lieu à une très faible diffraction de l'onde plane incidente de reconstitution. Pratiquement, les deux termes t_0b et $b\beta'|F|^2$ sont confondus avec l'onde directement transmise.



Le troisième terme $b\beta'a_0Fe^{iK\theta\xi}$ donne, au facteur près $b\beta'a_0e^{iK\theta\xi}$ l'amplitude $F(\eta,\xi)$ produite par la source ponctuelle. On peut donc écrire:

$$F(\eta,\xi) = F_0e^{iK\sqrt{p^2+\eta^2+\xi^2}} \quad (11)$$

Il s'agit d'une onde sphérique divergente qui provient d'une image virtuelle de la source et située à la distance p' de l'hologramme. Le facteur de phase $e^{iK\theta\xi}$ montre que l'image S' se trouve dans une direction faisant un angle θ avec la normale à l'hologramme.

Le dernier terme $b\beta'a_0F^*e^{-iK\theta\xi}$ est proportionnel à l'onde conjuguée $F^*(\eta,\xi)$ et alors:

$$F^*(\eta,\xi) = F_0e^{-iK\sqrt{p^2+\eta^2+\xi^2}} \quad (12)$$

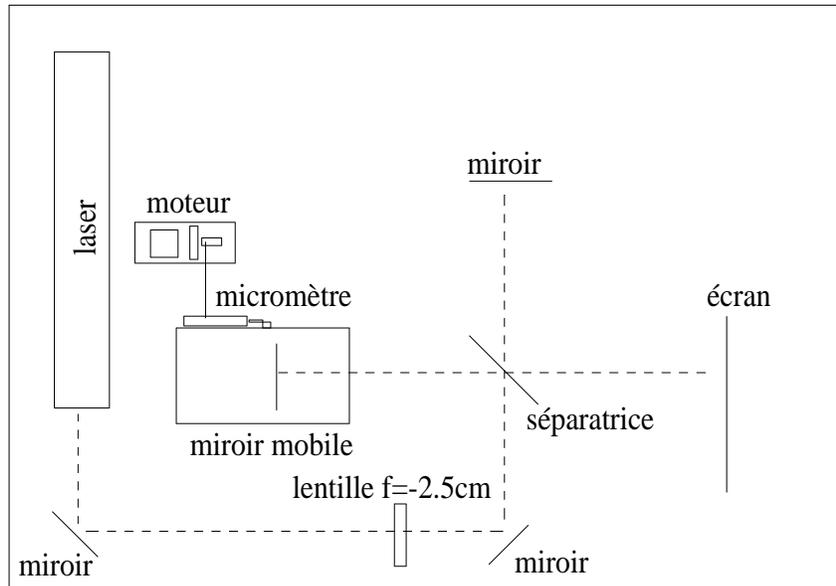
Ce terme correspond à une onde sphérique convergente produisant une image réelle de la source et située à une distance p' de l'hologramme. Encore une fois, le facteur de phase $e^{-iK\theta\xi}$ indique

que l'image S'' se trouve dans une direction faisant un angle θ avec la normale à l'hologramme. Le cas de la reconstitution d'un objet de forme quelconque est traité dans le livre de M. Françon.

3. PARTIE EXPÉRIMENTALE

3.1 Interféromètre de Michelson

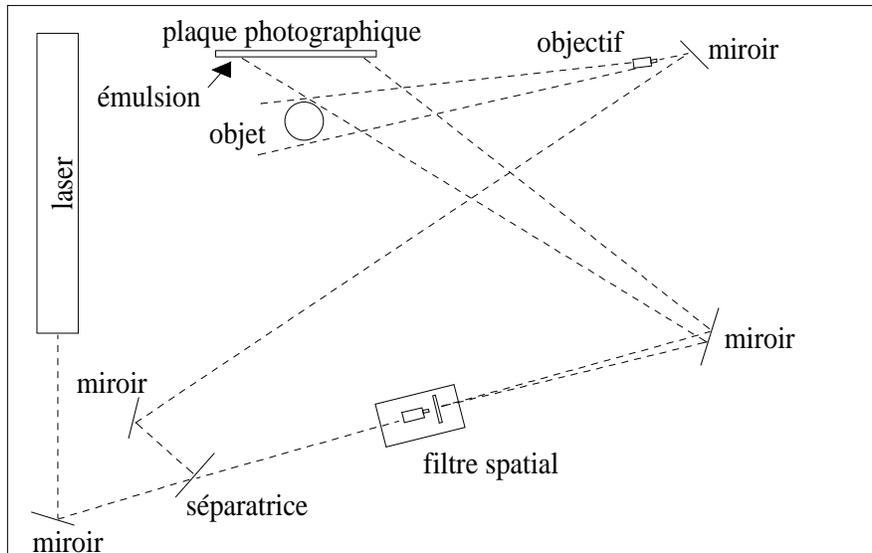
- Fabriquez un interféromètre de Michelson comme celui illustré ci-dessous.



- Discutez de la stabilité du montage.
- Mesurez la longueur d'onde du laser en comptant combien de franges apparaissent lorsqu'on déplace le miroir mobile sur une distance connue. Pour cela, utilisez la photodiode et le compteur d'impulsions.
- Estimez une limite inférieure pour la longueur de cohérence du laser.

3.2 Hologrammes de transmission

- Réalisez le montage suivant:



- Prenez soin d'utiliser des parcours optiques de longueurs identiques.
- Décrivez le rôle et le fonctionnement du filtre spatial. Celui-ci est formé d'un objectif de microscope (10X) qui sert à focaliser le faisceau de référence dans un trou de 25 microns. Il est possible que la personne en charge de l'expérience vous demande de ne pas le mettre immédiatement pour la prise des premières. Discutez des avantages et désavantages avec le superviseur.
- Nous vous encourageons à utiliser une photodiode pour mesurer le rapport des intensités lumineuses au niveau de la plaque photographique : pour les premiers essais, notre œil s'avère suffisant pour les besoins de l'expérience. Essayez d'obtenir un rapport 4/1 (référence/objet). Utilisez des polariseurs au besoin pour atténuer les faisceaux référence et objet.

Procédure à suivre pour l'enregistrement d'un hologramme de transmission :

Note : Retirer une plaque holographique de la boîte de plastique noire en utilisant une faible lumière verte dans la pièce. Refermez ensuite rapidement et correctement la boîte.

1. Fixez la plaque photographique en verre dans son support dans l'obscurité. En fait, vous pouvez allumer la lumière verte car l'émulsion n'est sensible qu'au rouge. Prenez soin de placer le côté où se trouve l'émulsion face à votre objet. Vous le reconnaîtrez en mouillant légèrement votre doigt et en le frottant sur la pellicule. Le côté où se trouve l'émulsion devrait être légèrement collant.

2. Prenez soin de remettre le paquet de pellicules dans son emballage avant d'allumer les lumières.
3. Sous l'éclairage de la lumière verte, installez solidement le support de la pellicule sur la table optique. Tenez l'obturateur du faisceau laser dans votre main sans vous appuyer sur la table. Attendez quelques secondes et procédez à l'illumination de la pellicule. Vous devriez débiter avec un temps d'exposition d'environ 5 à 15 secondes.
4. Remplacez l'obturateur devant le faisceau laser et coupez l'alimentation de ce dernier.

Procédure à suivre pour le développement

N.B. Vous pouvez travailler sous l'éclairage de la lumière verte.

**ATTENTION : Portez sarrau, gants et lunettes pour manipuler les produits chimiques.
Utilisez la ventilation de la hotte.**

Préparation : N'utiliser qu'une quantité suffisante de produit pour recouvrir une plaque holographique (environ 3 mm).

1. Mettre le développeur A+B dans le bac DÉVELOPPEUR.
2. Mettre de l'eau dans le bac EAU.
3. Mettre la solution de blanchiment dans le bac BLEACH.
4. Mettre de la solution de rinçage (photo-flo) dans le bac RINCE.

Instructions :

1. Immergez l'hologramme (émulsion sur le dessus) dans le bac DÉVELOPPEUR pour obtenir l'opacité voulue (99% pour les hologrammes de réflexion et 50% pour les hologrammes de transmission).
2. Rincer l'hologramme dans le bac EAU en l'agitant durant 30 sec.

Note : Pour les hologrammes en transmission, vous pouvez arrêter ici et aller voir le résultat de votre hologramme. Vous pourrez par la suite procéder au blanchiment et voir la différence sur la luminosité de l'hologramme.

3. Placez-le dans le bac BLEACH jusqu'à ce qu'il devienne totalement transparent.
4. Rincer l'hologramme dans le bac EAU en l'agitant durant 30 sec.

5. Mettre l'hologramme dans le bac RINCE pour enlever toutes les coulisses.
6. Séchez l'hologramme au séchoir doucement.

Rangement des plaques et des solutions :

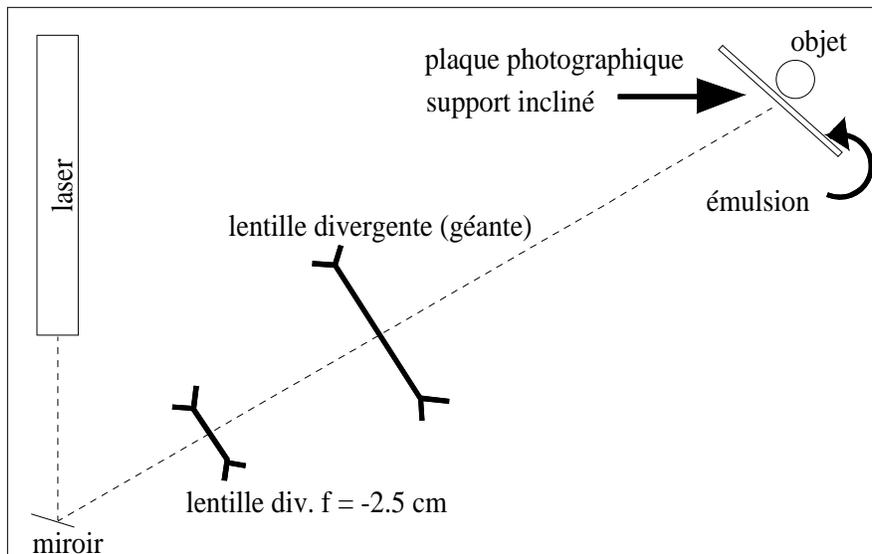
Les plaques holographiques doivent être rangées dans le réfrigérateur à l'atelier mécanique (jamais dans un frigo où il y a de la nourriture).

Remettre les solutions utilisées dans leurs contenants de départ et rangez les sous la hotte.

Bien rincer les bacs et les assécher.

3.3 Hologrammes de réflexion à faisceau unique

- Réalisez le montage suivant:



Procédure à suivre pour l'enregistrement d'un hologramme de réflexion

1. Fixer une plaque photographique dans le support. Le côté de l'émulsion devra faire face à l'objet à holographier.
2. Installez-le sur le support incliné du montage. Placez l'objet très près de la plaque.
3. Alignez le montage de façon à couvrir la plaque **uniformément** avec le faisceau laser.
4. Exposez environ 5 secondes.

Procédure à suivre pour le développement

1. Reprendre la procédure de développement des hologrammes en transmission.
2. Vous devez obligatoirement blanchir ce type d'hologramme.
3. Vous pouvez peindre en noir la surface sur laquelle repose l'émulsion. Ce procédé accentue le contraste de l'image obtenue.

Visualisation de l'hologramme de réflexion

Visualisation de l'hologramme de transmission (attention à vos yeux, évitez tout faisceau direct).

1. Remplacez la pellicule dans son support.
2. Enlever l'objet devant la pellicule.
3. Coupez le faisceau qui illuminait l'objet.
4. À l'aide du faisceau de référence, illuminez la pellicule et placez-vous derrière le support en regardant selon la normale à la pellicule. Vous pouvez augmenter l'intensité du faisceau de référence en tournant le polariseur au besoin.

3.4 Hologrammes divers

- Essayez de proposer et de réaliser un hologramme par une méthode différente de celles utilisées précédemment. Il peut s'agir d'une modification d'un des montages ou d'une autre forme d'hologramme.

4. PRÉCAUTIONS À PRENDRE

- Le faisceau direct du laser que vous utiliserez est assez puissant pour causer des dommages permanents aux yeux. Évitez les manipulations brusques et avertissez toujours les gens qui vous entourent lorsque vous modifiez le trajet des faisceaux.
- N'exposez jamais les pellicules non utilisées à la lumière blanche.
- Ne posez jamais les doigts sur la région de la pellicule qui sera exposée.
- N'oubliez surtout pas que le secret pour réussir de bons hologrammes est la stabilité du montage. Évitez de parler et de bouger, durant un bon moment, avant d'exposer la pellicule.

5. POINTS DE DISCUSSION

- Comment s'inscrivent les franges sur des hologrammes de transmission et de réflexion?
- Quelle est la distance entre chacune de ces franges?
- Quelles sont les applications de l'holographie?
- Qu'est-ce que la méthode du contraste de phase?

Références

- Holographie. M. Françon. Ed. Masson 1987.
- The applications of Holography. H.J. Caulfield & Sun Lu. Wiley-Interscience 1970.
- Homegrown Holography. G. Dowbenko. Amphoto. 1978.
- Holographie optique. J.C. Viénot. Dunod 1971. (bibliothèque générale)
- L'Holographie. J. Héraud. Dunod 1987. (bibliothèque générale)
- Optique géométrique et ondulatoire. J.P. Pérez. Masson 1988.

BARÈME DE CORRECTION

Théorie.....	2.5
Montage et fonctionnement.....	1
Présentation des résultats.....	2
Analyse.....	3
Introduction et conclusion.....	1
Présentation générale et qualité du français.....	<u>0.5</u>
Total.....	10