

Holographie et applications

Batot Guillaume & Bimbard Erwan

20 mars 2008

Introduction

L'holographie connut ses débuts en 1891 lorsque G.Lippmann élaborait le principe de la photographie interférentielle, puis se vit attribuer un statut à part entière avec les travaux de D.Gabor en 1947, et connut ensuite de multiples développements et applications. Cette technique a pour but d'arriver à restituer après une phase d'enregistrement l'image en 3 dimensions d'un objet, c'est-à-dire de pouvoir enregistrer l'intégralité ("holos") du message ("gramma") que l'oeil reçoit de l'objet lorsque celui-ci est éclairé. Pour ce faire il faut dépasser le stade de la photographie qui permet uniquement d'enregistrer sur un film photosensible 2D les variations d'intensité de la lumière émise par l'objet : pour restituer la sensation de relief et les différents angles d'observation de l'objet, il faut pouvoir enregistrer les variations spatiales de la phase de la lumière diffusée par l'objet, en plus de sa distribution d'intensité. C'est cela que l'holographie parvient à effectuer grâce au phénomène d'interférences, permettant ainsi de conserver une image complète et figée d'un objet à un instant donné, ce qui ouvre ensuite l'horizon à de multiples applications. Le but de ce projet était donc de se familiariser avec le principe théorique de l'holographie, les contraintes expérimentales à respecter pour réussir des enregistrements, et bien sûr d'arriver en pratique à produire des hologrammes, ainsi que de leur trouver des applications utiles réalisables avec les moyens à notre disposition.

Table des matières

1	Principe de l'holographie	4
1.1	Conditions d'enregistrement d'un hologramme	4
1.1.1	Idée générale	4
1.1.2	Contraintes à respecter	5
1.1.3	En pratique	6
1.2	Différents types d'hologrammes et les montages correspondant	7
1.2.1	Hologrammes par transmission	7
1.2.2	Hologrammes par réflexion	8
2	Exploitation de l'hologramme	9
2.1	Enregistrement de l'hologramme	9
2.1.1	Qu'est-ce qu'une plaque holographique?	9
2.1.2	Développement du support holographique	10
2.2	Lecture des différents types d'enregistrement	12
2.2.1	Lecture d'un hologramme par transmission	12
2.2.2	Lecture d'un hologramme par réflexion	13
3	Applications de l'holographie	14
3.1	Holographie interférentielle, visualisation de contraintes	14
3.2	Protection, sécurité	14
3.3	Autres applications	15
4	Annexes	18
4.1	Un calcul plus rigoureux...	18
4.2	Cohérence	18
4.3	Visualisation d'hologramme en changeant de longueur d'onde	19
4.4	Chimie du développement argentique	20
5	Références	21

1 Principe de l'holographie

1.1 Conditions d'enregistrement d'un hologramme

1.1.1 Idée générale

Se demander comment enregistrer l'hologramme d'un objet revient à se poser la question : comment réussir à enregistrer la phase de la lumière diffusée par cet objet ? Car c'est bien l'intensité lumineuse qui permet à l'œil de différencier des textures par leur luminosité par exemple, mais c'est le déphasage entre la lumière venant d'un point de l'objet et celle venant de son proche voisin qui permet au cerveau de reconstituer l'information de relief. La condition "qualitative" pour espérer obtenir une image en 3D est donc d'arriver à mémoriser la phase d'un faisceau lumineux.

Pour cela, l'idée est d'utiliser un phénomène dans lequel on sait que la phase se manifeste directement : les interférences. La base de l'holographie est donc de faire interférer l'onde lumineuse provenant de l'objet et une onde de référence bien connue. Ces interférences pouvant être constructives ou destructives suivant la phase relative des deux faisceaux, elles représentent bien une sorte de mémoire de la phase du faisceau objet, que l'on va chercher à enregistrer.

Dans ce but, sur le même principe que la photographie, on utilise des plaques photosensibles qu'on expose à la superposition des faisceaux dans des conditions bien particulières, et qui réagissent en fonction de l'intensité lumineuse reçue, enregistrant ainsi la phase du faisceau objet via les interférences qu'elle produit. Nous verrons ensuite qu'on peut les développer, et en les éclairant de façon appropriée récupérer l'image en relief de l'objet.

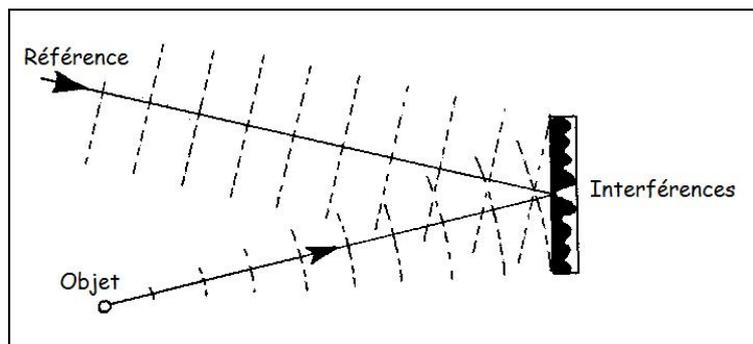


FIG. 1 – Principe de l'enregistrement (hologramme par transmission)

Pour illustrer cette idée par un calcul extrêmement qualitatif¹, considérons que sur la plaque arrivent deux ondes d'amplitudes complexes O et R représentant les faisceaux objet et référence. L'intensité lumineuse au niveau de la plaque vaut donc : $I = |O + R|^2 = |O|^2 + |R|^2 + O.R^* + O^*.R$.

Les plaques ont une réponse à l'éclairement qui leur est propre (et qui sera abordée plus loin), mais elles sont dans notre cas utilisées de manière à ce que leur transmittance après développement soit de la forme $T = a + b * I$. La transmittance de la plaque considérée est donc :

$$T = a + b.I = a + b.(|O|^2 + |R|^2 + O.R^* + O^*.R)$$

La technique consiste alors à éclairer cette plaque par exactement le même faisceau que celui ayant servi de référence lors de l'enregistrement, en supprimant le faisceau objet. On obtient alors derrière la plaque, qui module le faisceau par sa transmittance, une onde d'amplitude complexe :

$$H = T.R = (a + b.(|O|^2 + |R|^2 + O.R^* + O^*.R)).R = (a + b.(|O|^2 + |R|^2)).R + |R|^2.O + R^2.O^*$$

On voit trois termes dans la forme de l'onde restituée après la plaque :
Le premier, $(a + b.(|O|^2 + |R|^2)).R$, est proportionnel à R et correspond donc à "l'ordre 0" de l'onde

¹Pour un calcul plus rigoureux voir en annexes

transmise par la plaque, donnant à un facteur multiplicatif près l'onde émergeant directement du faisceau de référence servant d'éclairage, et est donc sans grand intérêt.

Le deuxième terme par contre est, au facteur $|R|^2$ (qui est réel) près, la reconstruction de O , c'est-à-dire de l'onde qui au moment de l'enregistrement venait de l'objet ! Si on regarde à travers la plaque éclairée, cette partie de l'onde lumineuse va donc reconstituer exactement l'onde que l'on aurait reçu s'il avait été présent : on verra bien l'image (virtuelle) en 3D de notre objet.

Enfin le dernier terme correspond à un phénomène secondaire qui peut avoir une utilité mais qui ne nous intéressera pas ici (en partie parce que nous n'avons pas réussi à l'observer) : l'hologramme secondaire, une image réelle qui est normalement symétrique de la première et récupérable en inversant l'onde de restitution (ce terme est, si on prend pour R une onde plane, proportionnel à O^* , donc il contient bien aussi l'information venant de l'objet).

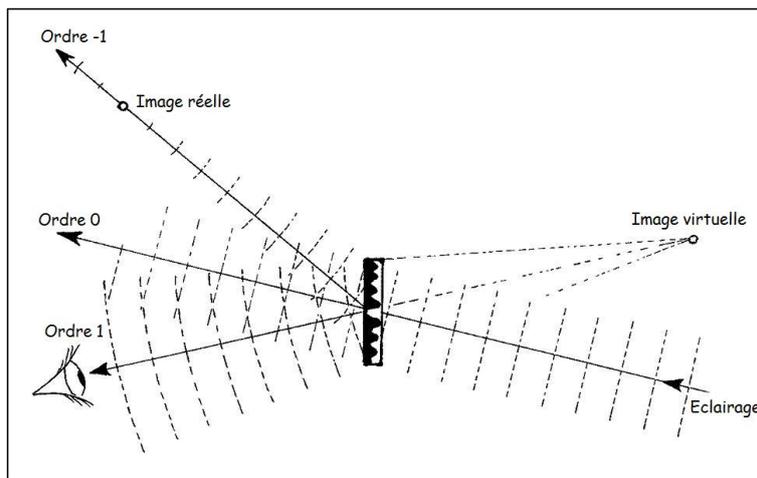


FIG. 2 – Principe de la restitution (hologramme par transmission)

1.1.2 Contraintes à respecter

Evidemment tout ceci ne donne qu'un principe général, une idée de ce qu'il faudrait arriver à faire pour enregistrer un hologramme. Nous allons maintenant voir les contraintes que cette idée de départ impose.

On est sûrs de rencontrer un certain nombre d'obligations venant du fait que l'on veut utiliser des interférences lors du processus. On devra donc respecter les contraintes permettant d'obtenir des interférences² entre les faisceaux référence et objet :

- Il faut que les deux éclairages soient cohérents, ce qui impose que les deux faisceaux doivent provenir d'une même source, d'où l'utilisation d'un faisceau unique que l'on séparera.
- On doit faire attention à la source utilisée, car qui dit séparation du faisceau en deux pour des interférences, dit égalité approximative des chemins optiques parcourus. Le "approximative" cache le fait que pour obtenir des interférences nettes il faut que la différence de chemin optique soit inférieure à la longueur de cohérence, propre à la lampe. Cela nous conduit, vue la précision des mesures, à travailler plutôt avec un laser ($l_c \sim$ quelques dizaines de cm) qu'avec une lampe à lumière blanche ($l_c \sim$ quelques μm).
- Réaliser des interférences requiert le moins de variations possibles pendant l'enregistrement, puisqu'une modification de l'ordre de la longueur d'onde d'un des chemins annihilera les franges. On s'isole donc avec le plus grand soin de toute vibration, en utilisant en particulier une table inerte en métal sur laquelle on peut fixer tous les éléments du montage avec des aimants.

²Pour quelques détails sur lumière cohérente, longueur de cohérence, etc... voir en annexes

- D'autres contraintes doivent être respectées pour obtenir des hologrammes, propres à cette technique :
- Comme l'un des faisceaux que l'on utilise doit être diffusé par l'objet avant d'atteindre la plaque photosensible, pour avoir une intensité convenable du faisceau objet il faut utiliser des objets réfléchissant bien la lumière, dans notre cas majoritairement des objets métalliques ou blanc (les objets en plâtre fonctionnent bien).
 - Pour obtenir un enregistrement bien contrasté il faut que les intensités lumineuses des deux faisceaux soient du même ordre de grandeur, avec supériorité de la référence (notre expérience nous fait dire que le rapport $\frac{I_{ref}}{I_{obj}}$ doit être de l'ordre de 2 à 4 pour une bonne qualité).
 - L'utilisation d'un laser dont le faisceau est spatialement très localisé impose, afin d'éclairer uniformément toute la plaque et l'objet, l'intervention d'un dispositif essentiel dans notre montage, l'épurateur de faisceau. Il est constitué d'un objectif de microscope (simple lentille à courte focale) secondée d'un diaphragme extrêmement précis qui doit être placé au point focal image de la lentille. Ceci permet d'une part d'étaler considérablement le faisceau de façon uniforme, et d'autre part d'épurer le faisceau laser en ne gardant que le mode fondamental du rayonnement grâce au positionnement précis du diaphragme qui élimine les autres. Un épurateur de faisceau est placé sur chacun des trajets, dernier obstacle avant l'objet ou la plaque de façon à ne pas rajouter les défauts intrinsèques des miroirs par exemple sur le faisceau épuré.

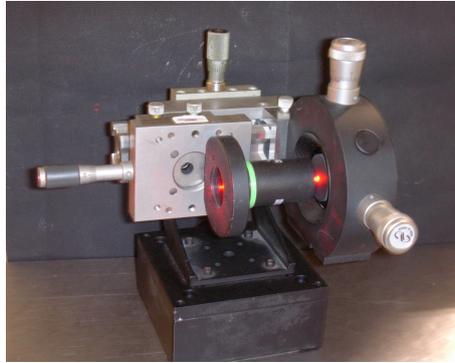


FIG. 3 – Epurateur de faisceau

- On peut aussi noter que pour ne pas avoir d'éclairage parasite il faut éviter d'une part que le faisceau de référence n'éclaire l'objet, et d'autre part que le faisceau servant à illuminer l'objet n'atteigne directement la plaque.

1.1.3 En pratique ...

Après toutes ces considérations, on peut encore se demander comment, en pratique, se déroule l'enregistrement d'un hologramme. On part du faisceau d'un laser sur la table isolée, que l'on sépare en deux (avec une prisme ou une lame semi-réfléchissante). On fait parcourir à chacun des trajets optiques équivalents aboutissant sur des épurateurs de faisceau, l'un éclairant directement la plaque, l'autre frappant l'objet de manière à diffuser la lumière vers la plaque.

On s'assure de l'égalité des trajets optiques, et on mesure avec un luxmètre les intensités dues à chaque faisceau au niveau de la plaque, ce qui sera en général suivi d'une atténuation de la référence avec des filtres de façon à obtenir un rapport correct.

Ceci étant fait le montage est prêt, reste l'enregistrement proprement dit. On prépare à l'avance en salle noire une plaque photosensible dans une boîte fermée qu'on apporte près du montage, on éteint toute lumière, on place la plaque sur son support (ce qui demande un certain entraînement pour ne pas bousculer un quelconque élément du montage!), et lorsque tout est prêt on allume le laser pendant un temps bien déterminé (dans notre cas de l'ordre de la dizaine de secondes) qui dépend de la sensibilité des plaques, afin d'en permettre l'impression.

Une fois le laser coupé l'hologramme est enregistré, prêt à être développé. Les détails et contraintes relatives spécifiquement aux plaques et au développement seront exposés plus tard.

1.2 Différents types d'hologrammes et les montages correspondant

Même maintenant il subsiste un flou volontaire sur le montage utilisé : c'est tout simplement parce qu'il en existe de deux types, respectant tous les contraintes exposées ci-dessus, mais donnant des résultats aux propriétés assez différentes.

1.2.1 Hologrammes par transmission

On les appelle ainsi car on les observe une fois développés en illuminant une face de la plaque et en regardant à travers la lumière transmise. Le montage d'enregistrement est spécifique du fait que les faisceaux référence et objet frappent la plaque du même côté. Les franges d'interférences entre les deux se produisent donc dans un plan parallèle à la plaque et viennent donc s'enregistrer à sa surface.

Nous avons d'abord pensé au montage suivant pour réaliser des hologrammes par transmission :

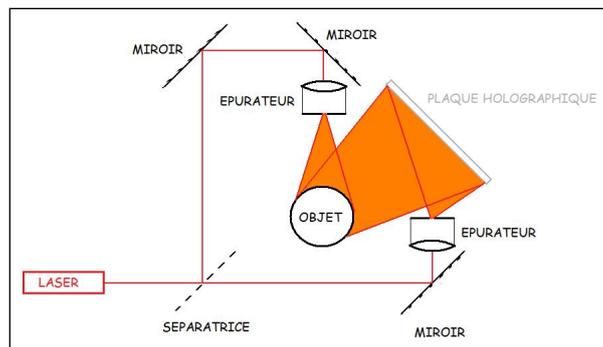


FIG. 4 – Premier montage par transmission

Sa géométrie n'étant pas optimale pour égaliser les trajets optiques car il n'est pas très symétrique, nous avons décidé de changer notre montage pour un autre qui semblait plus pratique, éliminant un miroir en surplus, et plus facile à régler (les difficultés de réglages diverses s'ajoutant, on choisit un schéma de départ simple et symétrique pour minimiser les erreurs possibles). Dans celui-ci on exploite le fait que le croisement du faisceau éclairant l'objet et de la référence ne pose pas de problème, car ces ondes ne se perturbent plus mutuellement hors de la zone de recouvrement, quand elles atteignent l'objet ou la plaque :

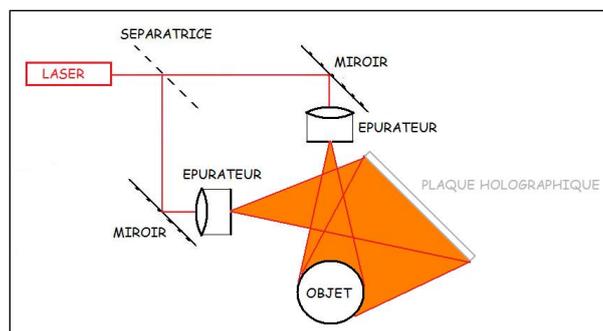


FIG. 5 – Deuxième montage par transmission

Nous avons réalisé la plupart de nos hologrammes avec ce montage lors de ce projet, et après un réglage minutieux, en particulier des épurateurs, nous avons obtenu rapidement des enregistrements restituables d'assez bonne qualité, ce qui fut il faut le dire assez satisfaisant !

Ce type d'hologramme peut s'obtenir sans trop de problèmes mais présente l'inconvénient comme on le verra plus tard de ne pouvoir être restitué correctement qu'en lumière monochromatique. On voit sur les schémas un détail important dans tous les montages : il faut que le faisceau référence fasse un angle appréciable avec la normale à la plaque, car on restitue l'hologramme avec ce même faisceau, et le cas contraire conduirait lors de l'observation à recevoir la lumière directe du laser dans les yeux.

1.2.2 Hologrammes par réflexion

Ce type d'hologrammes se distingue du précédent lors de l'enregistrement du fait que l'on éclaire la plaque des deux côtés, l'un recevant la référence, l'autre le faisceau objet. Cela requiert des montages un peu différents, et produit des interférences qui s'inscrivent dans l'épaisseur de la plaque. En effet les deux ondes se rencontrant de front, on va avoir dans l'épaisseur de la plaque une succession de plans équidistants qui subiront une impression élevée due aux interférences constructives. Dans chacun de ces plans va s'inscrire la totalité de l'enregistrement holographique des franges d'interférences entre onde objet et référence.

Cela produit une structure relativement différente de précédemment et donne à ces hologrammes une propriété particulière qui sera discutée plus loin, celle d'être visible en lumière blanche. Ils sont comme leur nom l'indique observés par réflexion dans la plaque du faisceau de restitution.

Nous avons voulu pour ces enregistrements utiliser un montage un peu particulier vu dans un ouvrage, sensé permettre l'enregistrement d'objets peu réfléchissants en démultipliant les faisceaux d'éclairage de l'objet, d'où la relative complexité du schéma, et la difficulté pratique d'égaliser tous les chemins optiques :

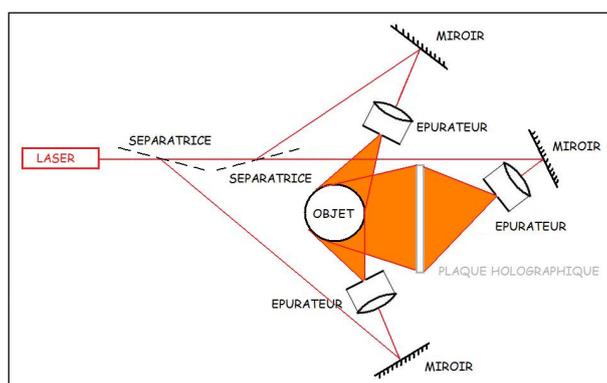


FIG. 6 – Premier montage par réflexion

Nous avons néanmoins réussi à produire des hologrammes de cette façon. Nous avons ensuite été tentés par l'excès inverse, à la vue d'un montage simpliste proposé partout qui semblait pouvoir marcher :

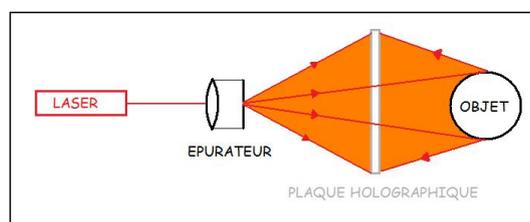


FIG. 7 – Deuxième montage par réflexion

Le problème apparut néanmoins rapidement : aucun moyen de contrôler les intensités objet et référence séparément, et nécessité de placer l'objet très proche de la plaque, ce qui rend la manipulation dans le noir risquée!

2 Exploitation de l'hologramme

Nous avons pu voir dans un premier temps ce qu'était l'holographie et quels étaient les différents types de montages possibles : réflexion et transmission.

Une fois le montage mis en place tout n'est pas joué car il nous faut garder à l'esprit que l'hologramme doit encore être enregistré, imprimé sur une plaque émulsive -équivalent d'un film iso pour un appareil photographique argentique. Ainsi pour que nos résultats soient optimum il va falloir respecter de nouveaux lots de contraintes inhérents à l'exposition -réception des faisceaux par la plaque- et au développement de notre support.

2.1 Enregistrement de l'hologramme

Pour l'instant nous ne ferons pas de distinction entre l'enregistrement par réflexion ou par transmission, pour l'un comme pour l'autre l'enregistrement -en terme d'exposition- et le développement sont similaires.

2.1.1 Qu'est-ce qu'une plaque holographique ?

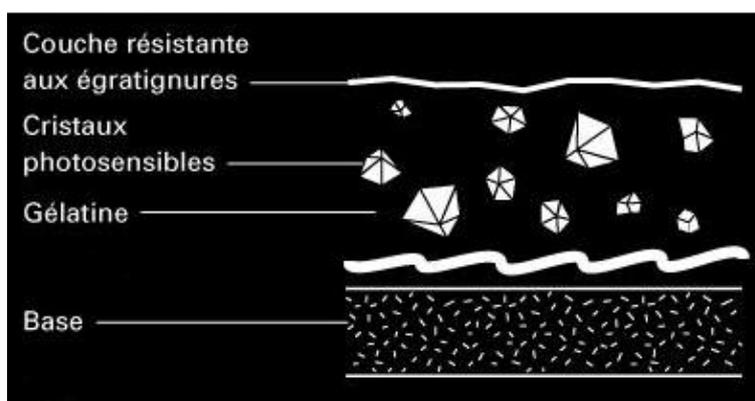


FIG. 8 – Constitution d'une plaque holographique

Utilisation du support d'enregistrement

Pour enregistrer un hologramme nous pouvons nous servir de films ou de plaques holographiques -le support. La plaque est la mieux adaptée, en effet nous exploitons ainsi l'épaisseur du verre pour loger notre hologramme, le rendu n'en est que meilleur. Nous avons travaillé, dans le cadre de notre expérience, avec des plaques de sensibilité $300\mu J.cm^{-2}$ -nous expliciterons plus loin ce que cela peut signifier.

Le support est recouvert d'une fine couche d'émulsion, de la gélatine, qui diffère sensiblement d'une émulsion classique pour photographie. En effet l'émulsion holographique comme nous avons pu le dire plus haut doit pouvoir enregistrer la phase de l'objet, doit être sensible aux interférences lumineuses. Le "grain" du support holographique est beaucoup plus fin qu'un film photographique, une centaine de traits contre plusieurs milliers. Nos plaques comportaient, d'après le constructeur, 3000 traits/mm.

Nous avons tous déjà pu faire l'expérience, avec notre vieil appareil photo argentique, d'une prise de vue "grillée", complètement noire. Pour nos plaques c'est le même principe -et nous avons eu le "plaisir" de pouvoir refaire cette expérience avec elles-, le noircissement est proportionnel à l'intensité lumineuse reçue. Par ailleurs le temps d'exposition est quelque chose du type "le rapport de la sensibilité sur la puissance moyenne incidente".

Il nous faut contrôler l'intensité des faisceaux arrivant sur le support avant de positionner ce dernier. Cependant réduire l'intensité ou les temps d'exposition pour éviter de brûler la plaque ne nous garantit pas la lisibilité de notre hologramme. En effet, n'oublions pas que nous enregistrons la phase de l'objet, à l'aide de deux rayons lumineux. Il est nécessaire de garder un rapport "correct" entre l'intensité de ces deux faisceaux. Voyons ce que peut signifier "correct".

Voici la courbe de réponse typique d'une émulsion :

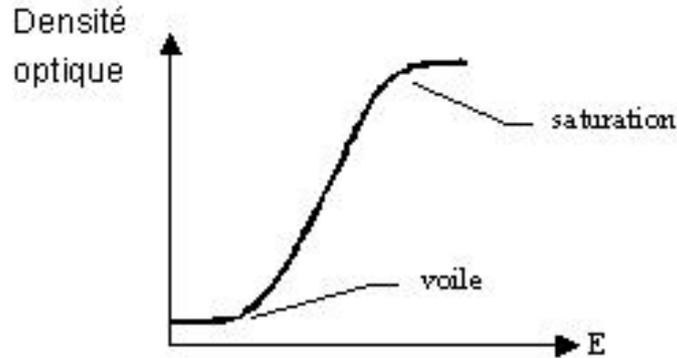


FIG. 9 – Courbe de réponse de l'émulsion holographique

Si nous nous plaçons dans le cas de figure où les intensités sont égales, un rapport de 1, nos extrêmes d'enregistrement vont être à la frontière de la zone notée voile et de celle notée saturation : nous obtiendrons un contraste maximum, mais ce n'est pas vraiment l'idéal. Il sera plus judicieux d'exploiter la zone linéaire de cette courbe de réponse, c'est à dire de prendre une intensité pour le faisceau de référence comprise entre 2 à 5 fois plus importante que celle du faisceau objet.

Pour récapituler, nous devons donc, et ce avant de positionner le support d'enregistrement, connaître l'intensité lumineuse arrivant sur la plaque et vérifier que l'intensité référence soit au moins deux fois plus grande que celle de l'objet. Le luxmètre va devenir l'outil indispensable.

La sensibilité d'une plaque holographique

Revenons sur la sensibilité de nos plaques : $300\mu J.cm^{-2}$. Que signifie ceci en unité lux ? Regardons la correspondance suivante : $1lux.s = 1lm.m^{-2}.s$.

Où lm signifie lumen, qui par définition correspond "au flux émis dans un angle solide de 1 stéradian par une source ponctuelle uniforme située au sommet de l'angle solide dont l'intensité vaut 1 candela" : $1lm = 1cd.sr$.

Nous ne sommes alors pas plus avancés, car il nous faut maintenant détailler ce qu'est la candela. La candela a été définie le 21 octobre 1948 par la neuvième conférence générale des poids et mesures. La définition donnée à cette conférence stipulait qu'une candela était l'unité d'intensité lumineuse, définie selon le modèle du corps noir comme le rayonnement émis par $1/60e$ de cm^2 de platine à son point de solidification.

Nous voyons que tout ceci n'est pas très stimulant, le lecteur nous fera sûrement confiance si nous lui disons que nous avons finalement trouvé dans la littérature que $1lm = \frac{1}{68,5} W$.

Ainsi nous avons :

$$1lux.s = 1lm.m^{-2}.s = 0,015w.m^{-2}.s = 0,015J.m^{-2} \quad (1)$$

Nos plaques de $300\mu J.cm^{-2}$ ont donc une sensibilité de 200 lux.s. Ce qui signifie qu'il nous suffit en théorie d'exposer durant un temps suffisamment long pour cumuler 200 lux, i.e pour une intensité totale mesurée de 18 lux nous exposerons 11 secondes.

2.1.2 Développement du support holographique

Nous avons, en pratique, accompli la majeure partie de la création d'un hologramme il nous reste l'étape cruciale, finale du développement. Cruciale car un mauvais développement peut clairement détruire une plaque correctement exposée -nous en avons fait l'expérience malheureuse durant ce projet.

Les bains de développement

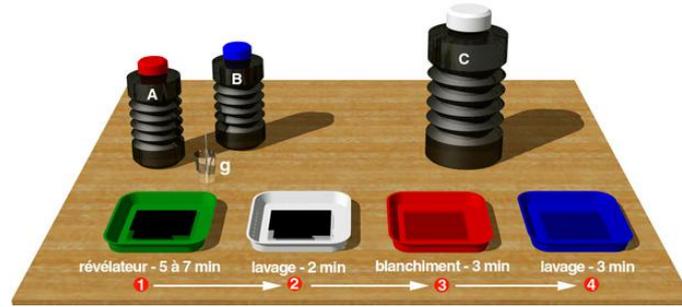


FIG. 10 – Produits utilisés pour le développement des plaques : A et B révélateurs, C fixateur ou bain de blanchiment

Le schéma n'est pas parfaitement représentatif de notre manipulation : nous n'avons pas effectué de blanchiment. Les temps dans chaque bain quand à eux vont dépendre des mélanges, principalement pour le révélateur. Pour citer notre mésaventure avec ces mixtures, nous avons manipulé pendant 3 journées avec des temps de 30s, 1min, 1min respectivement pour le révélateur, rinçage, fixateur : nous avons de bons hologrammes. Cependant le dernier jour, les bains ont changé, les temps avec, et tous les développements que nous avons dès lors effectués avec ces temps ne donnaient plus rien : aucune image. Nous n'avons pas modifié notre montage, ainsi nous avons pu nous rendre compte de l'importance que peuvent avoir les temps de développement sur le résultat final.

Le révélateur et le fixateur

Le bien nommé révélateur, nous permet de "noircir" les surfaces de la plaque qui ont été plus ou moins exposées. Quand à lui le fixateur permet en quelque sorte de figer, stabiliser l'image de l'hologramme, il permet de rendre la plaque "insensible" à une exposition à la lumière et d'arrêter l'action du révélateur.

Nous avons eu beaucoup de difficultés pour trouver des informations sur la chimie du développement holographique, nous vous renvoyons pour toute information plus détaillée en annexe où nous avons exposé succinctement le principe de développement argentique en photographie -assez proche du développement holographique dans le principe.

Il y a plusieurs techniques de rinçage. Nous nettoyions tout d'abord la plaque sous l'eau puis pour éviter les coulures ou toutes traces indésirables d'un produit nettoyant nous rinçions le tout à l'alcool avec un séchage au sèche-cheveux. Malgré tout, nous n'avons pas vraiment réussi à prendre le coup de main, des traces du séchage agrémentaient parfois nos hologrammes.

Il existe cependant une méthode beaucoup plus performante. La technique du "bain mouillant", rien d'autre que de laisser tremper un temps la plaque dans un bain savonneux, qui séchera ensuite toute seule sans auréoles.

Chimie du blanchiment, son utilité

Nous n'avons pas utilisé de bain de blanchiment, il nous semble cependant judicieux d'y consacrer un petit paragraphe car c'est une technique que la plupart des holographistes utilisent. Le blanchiment permet de rendre l'hologramme plus "lisible". Il est surtout utilisé pour les hologrammes à réflexion.

Grâce au bain de blanchiment nous transformons l'hologramme d'amplitude en hologramme de phase, la plaque devient transparente et les variations de densité sont changées en variations d'indice ou d'épaisseur. Ainsi, c'est la phase qui va être modifiée en passant à travers l'émulsion.

Généralement constitué d'un mélange de sulfochromique, il "attaque" la gélatine là où il y a des atomes d'argent : on obtient comme nous venons de le dire un hologramme de phase où l'indice est celui de l'air aux endroits où la plaque a été éclairée et celui de la gélatine sinon.

2.2 Lecture des différents types d'enregistrement

Nous n'avons jusqu'à présent volontairement fait aucune distinction entre hologrammes enregistrés par transmission ou par réflexion. Nous proposons dans ce paragraphe de mettre en évidence les différences entre ces deux hologrammes lors de leur restitution. Présentons d'abord les protagonistes de nos expériences, deux objets typiques de ceux utilisés pour obtenir de bons hologrammes :



FIG. 11 – Deux objets holographiés, lion métallique et tête de Mickey en plâtre

2.2.1 Lecture d'un hologramme par transmission

Ceci étant l'objet de la première partie, nous ne reviendrons pas en détail sur l'enregistrement de l'hologramme par transmission. Rappelons seulement que les faisceaux objet et référence rencontrent la plaque sur la même face avec un angle entre eux suffisamment grand. Seules les interférences sont enregistrées sur la plaque. Les zones où l'amplitude a été maximale seront les moins opaques, c'est à travers celles-ci que le faisceau de restitution traversera la plaque lors de la lecture. Regardons les images suivantes.

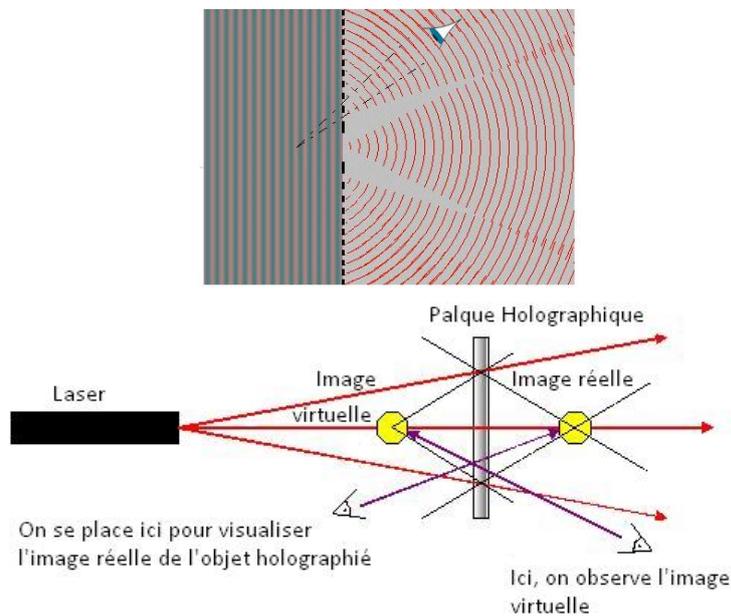


FIG. 12 – [Figure du haut] Trajet du faisceaux pour la restitution d'un hologramme par transmission, une bande rouge représente une amplitude maximale. Ici les interférences représentent celles d'un objet ponctuel. [Figure du bas] Illustration du parcours d'un faisceau de restitution pour la lecture d'un hologramme par transmission. Note : pour ces deux images l'angle d'incidence n'est pas respecté.

Sur ces schémas le faisceau de restitution arrive de la gauche, les bandes noires verticales représentent

les zones de la plaques qui lors de l'enregistrement n'ont pas été exposées (ou faiblement). Les "trous" représentent donc les zones exposées, c'est à dire les points où les faisceaux ont interféré constructivement lors de l'enregistrement. Ainsi nous "recréons" l'objet qui est alors vu par l'observateur en image virtuelle si il se place devant le faisceau -réelle sinon.

L'hologramme par transmission est donc nécessairement lu dans les mêmes conditions que celles de l'enregistrement : éclairage de l'objet par une source monochromatique, angle d'incidence avec la plaque proche de celui du faisceau référence.



FIG. 13 – Exemple d'hologramme par transmission obtenu

2.2.2 Lecture d'un hologramme par réflexion

Le principe de l'hologramme par réflexion est légèrement plus subtil que son homologue par transmission. Dans ces conditions l'hologramme peut être observé soit dans les conditions d'enregistrement, soit à l'aide d'une source polychromatique peu cohérente telle que le soleil.

L'enregistrement de ce type d'hologramme diffère du précédent sur ce point que le faisceau référence rencontre la plaque sur la face opposée à celle du faisceau objet. Lors de l'enregistrement, les faisceaux laser incident et réfléchi vont interférer de façon à former des ondes stationnaires, la plaque une fois développée sera ainsi constituée d'une succession périodique - tous les $\frac{\lambda}{2}$ - de plans d'indice n . La plaque va donc plus ou moins réagir de la même façon qu'un cristal, ne diffractant les rayons lumineux que pour certaines longueurs d'onde données -cela dépendra bien entendu aussi de l'inclinaison du support.

Nous comprenons donc aisément, à l'aide de la loi de Bragg, pourquoi nous pouvons observer un hologramme par réflexion avec une source polychromatique et pourquoi il nous faut ainsi trouver le bon angle d'incidence des rayons pour observer l'image de l'objet. Par ailleurs il est bon de noter que l'image de l'objet ne peut être dans ce cas que virtuelle.

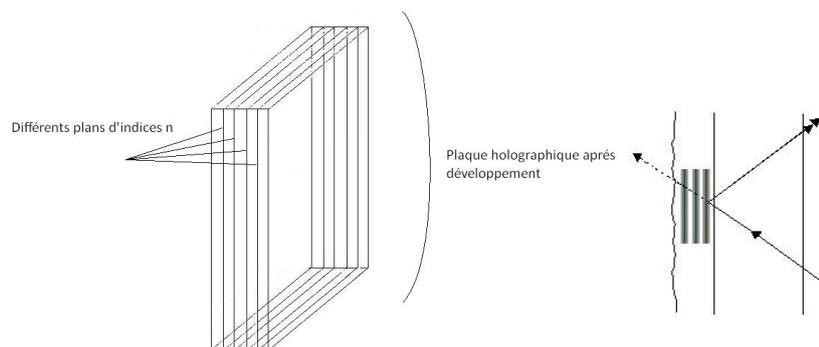


FIG. 14 – [Figure de gauche] Illustration des différents plans contenus dans la plaque holographique par réflexion. [Figure de droite] Trajet lumineux lors de l'observation d'un hologramme par réflexion

En résumé, tout réside dans l'enregistrement des interférences des deux faisceaux utilisés, nous pouvons faire "vivre" à un rayon un parcours semblable à celui de la lumière lorsque notre oeil observe un objet. Nous recréons de cette façon les conditions qui font que notre oeil voit l'objet en question.

3 Applications de l'holographie

3.1 Holographie interférentielle, visualisation de contraintes

Une application particulièrement intéressante de l'holographie que nous avons pu mettre en pratique concerne la visualisation de contraintes. Cela consiste à tirer parti de la capacité des hologrammes à enregistrer l'image totale d'un objet avec une grande précision spatiale, pour en faire une utilisation un poil plus complexe que ce que nous avons fait jusqu'ici, qu'on peut appeler holographie à double exposition.

Le concept consiste en fait à produire des interférences entre des ondes qui ne sont pas émises simultanément : si on peut enregistrer dans une plaque sensible l'information correspondant à la phase d'un signal, alors rien ne nous empêche d'en enregistrer deux ! En fait on va enregistrer sur la même plaque deux images d'un objet à des instants proches, entre lesquels il aura subi une légère modification. En faisant cela, lors de la restitution on verra, superposée à l'objet, les franges d'interférences entre les deux images, reflet direct de la modification subie.

On voit bien que cette technique laisse imaginer de nombreuses applications, d'autant plus qu'elle peut être réalisée de façon assez fiable : concrètement on fait exactement le même montage que précédemment (en transmission de préférence), on allume le laser pendant un demi-temps d'exposition, on l'éteint, on exerce une très légère contrainte sur l'objet, puis on réexpose pendant un demi-temps. Etant donné que l'image de l'objet est enregistrée via des interférences, ses variations spatiales sont détectées et visibles sur des longueurs de l'ordre de la longueur d'onde, ce qui permet par cette méthode de visualiser des contraintes extrêmement légère, déformant très peu l'objet.

Nous avons pu obtenir des résultats probants avec par exemple une plaque en métal coudée maintenue sous contrainte dans un support à vis d'optique, où l'on a tourné très légèrement la vis entre les deux poses ; ou encore avec un objet en plastique quelconque que nous avons très brièvement exposé à la flamme d'un briquet.

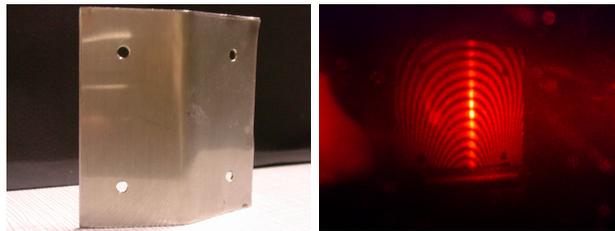


FIG. 15 – Hologramme de visualisation de contraintes : objet et hologramme final

Il faut bien réaliser que nous n'avons fait qu'une application qualitative de cette méthode, mais qu'elle peut être rendue quantitative et très puissante : on pourrait en mesurant l'interfrange local de la figure d'interférence accéder à une carte précise des valeurs de la déformation subie par l'objet entre les deux poses.

3.2 Protection, sécurité

L'holographie peut aussi être considérée comme un bon moyen pour vérifier l'authenticité d'un objet. Il est en effet très difficile voir quasi-impossible de faire la copie d'un hologramme, ou son jumeau. Même si on possède l'objet qui a été utilisé pour l'enregistrement, refaire le même implique de connaître les angles, les intensités, ... soit toutes les conditions d'enregistrement. La probabilité d'obtenir le même hologramme en ne possédant que l'objet est faible.

Faire la copie au sens strict d'un hologramme est d'autant plus dur : faire l'hologramme de l'hologramme nécessite des talents de "génie expérimental" -d'autant que le résultat n'est pas garanti.

On appelle aussi à tort "hologrammes" les "pastilles" brillantes que l'on appose sur les cartes bancaires, les passeports, les logiciels de certains systèmes d'exploitation ... En effet ce sont des pseudo-hologrammes



FIG. 16 – "Pseudo-hologramme" d'un passeport

car il ne contiennent *aucune* information 3D sur l'objet représenté. Le relief apparent s'inverse quand on tourne le dispositif de 180 ou disparaît si l'on tourne de 90.

3.3 Autres applications

On peut trouver de multiples applications à l'holographie, dans des domaines très variés, en voici quelques exemples :

- Certains musées ont recours à l'holographie dans leurs expositions pour pouvoir présenter au public des pièces rares, fragiles et uniques sans les exposer au vol ou à la détérioration.



FIG. 17 – Hologramme d'un casque du British Museum

- Elle peut être d'une autre utilité pour ces derniers puisqu'elle permet de déterminer avec précision la détérioration avec le temps d'oeuvres d'art telles que des tableaux, et ainsi de savoir quand et comment les restaurer.



FIG. 18 – Détérioration d'un tableau

- La puissance de l'enregistrement holographique permet également de reproduire l'action d'un instrument optique tel qu'une lentille sur les rayons lumineux. En holographiant une lentille et son point focal, on pourra restituer un objet holographique permettant de faire converger ou diverger des rayons lumineux.
- L'holographie permet de plus d'enregistrer dans de toutes petites surfaces une quantité énorme de données, et rend donc possible un stockage très efficace des données (par exemple un dvd holographique contenant 1.6 Teraoctets).
- Le principe de double exposition décrit plus haut peut être utile dans l'industrie pour visualiser avec précision les contraintes et déformations subies par les appareils, et permettre de prévenir d'éventuels pannes sur certaines pièces importantes.

Conclusion

Nous avons donc appris lors de ce projet que bon nombre de paramètres sont importants pour réussir un hologramme, et donc qu'il faut être minutieux et travailler sérieusement si on veut obtenir un montage raisonnable. Ceci est d'autant plus vrai lorsqu'on veut passer au stade suivant celui de simple enregistrement d'hologramme, par exemple pour visualiser des contraintes, car il faut que l'hologramme soit de bonne qualité pour espérer en superposer deux et observer quelque chose. Nous nous sommes aussi documentés, sur des concepts que nous n'avons pas expérimentés mais qui sont aussi intéressants et soulignent la multiplicité des possibilités ouvertes par les hologrammes : ceux-ci regroupent la méthode de blanchiment qui améliore notablement les hologrammes par réflexion, mais aussi tous les autres types d'hologrammes qui existent. En effet il est bon de savoir que par des méthodes différentes posant encore plus de difficultés il est possible d'obtenir des hologrammes en couleur, des hologrammes dits arc-en-ciel, ou encore des hologrammes mobiles par multiplexage! On peut dire que l'holographie a encore de beaux jours devant elle, car le nombre d'applications qu'elle permet est immense, et on commence à peine à réussir des exploits tels que la projection de vidéos d'hologrammes complets au-dessus d'un socle, autour desquels on peut tourner comme s'il s'agissait vraiment d'un objet flottant dans les airs (voir http://www.gizmodo.fr/2006/10/11/de_la_vraie_video_holographiqu.html). Dans ces conditions, qui peut dire ce que l'avenir nous réservera?

4 Annexes

4.1 Un calcul plus rigoureux...

La version quelque peu simpliste du calcul des intensités de restitution donnée a le mérite de permettre de comprendre ce qui se passe. On peut écrire plus rigoureusement, de dizaines de façons différentes plus ou moins détaillées, ce calcul, en voici un exemple : On prendra néanmoins pour simplifier un minimum une onde objet plane se propageant selon z : $\Psi_o = A_o e^{ikz}$.

L'onde de référence, également plane, a une direction de propagation faisant un angle θ_0 avec l'axe z , elle s'écrit donc : $\Psi_r = A_r e^{ik(-x \sin \theta_0 + z \cos \theta_0)}$.

On regarde l'intensité reçue en $z=0$ où l'on place la plaque :

$$\begin{aligned} I(x) &= I_r + I_o + A_r^* A_o e^{ikx \sin \theta_0} + A_r A_o^* e^{-ikx \sin \theta_0} \\ &= I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cos(kx \sin \theta_0 + \Delta\phi) \end{aligned}$$

On trouve donc bien des franges d'interférences, d'interfrange $i = \frac{\lambda}{\sin \theta_0}$. Dans la zone de linéarité des plaques, leur transmittance après développement vaut donc :

$$T(x) = T_1 + T_2(x) + T_3(x)$$

Avec :

$$\begin{aligned} T_1 &= a + b(I_r + I_o) \\ T_2(x) &= bA_r^* A_o e^{ikx \sin \theta_0} \\ T_3(x) &= bA_r A_o^* e^{-ikx \sin \theta_0} \end{aligned}$$

On reconstruit ensuite l'onde en éclairant la plaque avec Ψ_r , on obtient une onde diffractée par la plaque de la forme :

$$\Psi(\theta) \propto \int T(x) \Psi(x, z=0) e^{-ikx \sin \theta} dx$$

On obtient alors avec la forme de $T(x)$:

$$\Psi(\theta) = \Psi_1(\theta) + \Psi_2(\theta) + \Psi_3(\theta)$$

Avec :

$$\begin{aligned} \Psi_1(\theta) &\propto A_r (a + b(I_r + I_o)) \delta(\sin \theta + \sin \theta_0) \\ \Psi_2(\theta) &\propto bI_r A_o \delta(\sin \theta) \\ \Psi_3(\theta) &\propto bA_r^2 A_o^* \delta(\sin \theta + 2 \sin \theta_0) \end{aligned}$$

On retrouve donc l'ordre 0 proportionnel à A_r se propageant dans la même direction que le faisceau incident ($\theta = -\theta_0$), l'image proportionnelle à A_o semblant venir de l'objet ($\theta = 0$), et l'onde conjuguée se propageant dans une autre direction ($\sin \theta = -2 \sin \theta_0$).

4.2 Cohérence

Si l'on veut faire interférer deux ondes, elles doivent vérifier plusieurs conditions : on dit globalement qu'il faut qu'elles soient cohérentes. Voyons ce que cela signifie dans un modèle scalaire de la lumière, avec des vibrations parallèles : si on considère deux ondes lumineuses d'intensité individuelles respectives I_1 et I_2 , l'intensité produite par la superposition de ces deux ondes est : $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \phi)$, où ϕ est le déphasage entre les deux ondes. Or une source lumineuse habituelle n'est pas une source ponctuelle émettant une seule longueur d'onde en continu : une source est constituée de milliers d'atomes qui émettent chacun séparément des trains d'ondes de durée finie, chaque train d'onde émis ayant une phase aléatoire.

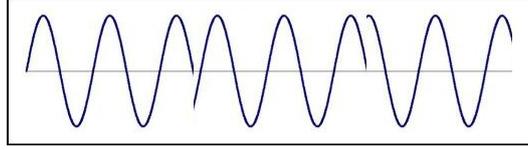


FIG. 19 – Emission de trains d'onde de phase aléatoire

La condition pour observer des interférences est d'avoir $\langle \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \phi) \rangle$ non nul. Cela impose $\omega_2 = \omega_1$: il faut donc utiliser des ondes de même fréquence.

De plus si on imagine deux sources distinctes, la phase relative des trains d'ondes interférant va varier aléatoirement comme ils viennent de sources indépendantes, donc $\langle \cos \phi \rangle$ sera nulle : il faut donc utiliser une seule source, dont on divise le faisceau lumineux en deux pour produire des interférences.

Même ainsi rien ne garantit le succès, car on voit également qu'il va falloir se débrouiller pour que chaque train d'onde interfère avec lui-même à la sortie du dispositif de séparation, car si les interférences se font entre trains d'ondes voisins, aucune relation de phase stable n'empêchera ϕ de varier aléatoirement. Cela se traduit en terme de différence de chemin optique entre les deux faisceaux qui doit être inférieure à la longueur d'un train d'onde pour garantir un déphasage constant.

La "longueur" moyenne des trains d'onde vaut $l_c = ct_c$ où t_c est le temps de cohérence défini par $t_c = \frac{1}{\delta\nu}$ et $\delta\nu$ est la largeur fréquentielle du signal émis. On obtient au final $l_c = \frac{\lambda_0^2}{\delta\lambda}$, λ_0 étant la longueur d'onde centrale de l'onde. Cette longueur de cohérence est donc une caractéristique de la source, qui donne une idée de la précision avec laquelle il faut égaliser les chemins optiques pour avoir des franges avec un bon contraste. On comprend donc que plus la source couvre un large spectre, plus l_c diminue.

On trouve pour le laser He-Ne ($\lambda_0 = 632.8nm$, $\delta\lambda = 10^{-3}nm$) que $l_c \simeq 20cm$, tandis qu'en lumière blanche ($\lambda_0 = 500nm$, $\delta\lambda = 400nm$), on trouve $l_c \simeq 10^{-7}m$! On parle ici de cohérence temporelle, par opposition à la cohérence spatiale qui impose que la source ne soit pas trop étendue pour éviter que les interférences produites par chaque point de la source ne se superposent de façon totalement anarchique.

4.3 Visualisation d'hologramme en changeant de longueur d'onde

On a vu que les hologrammes, en particulier ceux par transmission, étaient restitués en lumière monochromatique. Un effet intéressant se manifeste si on observe un hologramme avec une longueur d'onde différente de celle d'enregistrement : on montre que le produit $\lambda.d$ est constant, λ étant la longueur d'onde de restitution, d une distance mesurée sur l'hologramme.

Pour cela on raisonne comme si on faisait séparément l'hologramme de chaque point de l'objet, l'hologramme d'un point étant plus simple à étudier. Si un point forme une onde sphérique éclairant la plaque tandis qu'une onde plane arrive normalement à la plaque (on se placera dans ce cas plus simple bien que ce ne soit pas la configuration pratique), on obtient des franges d'interférences circulaires.

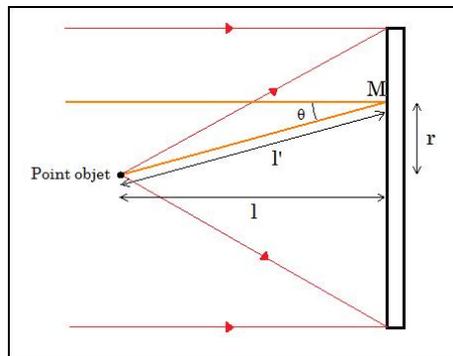


FIG. 20 – Hologramme d'un point

La différence de marche au point M vaut :

$$\delta = l' - l = l\left(\frac{1}{\cos\theta} - 1\right)$$

Soit au voisinage du centre de la figure ($r \ll l$) :

$$\cos\theta = \frac{r}{l} \simeq 1 - \frac{r^2}{2l^2} \Rightarrow \delta \simeq \frac{r^2}{2l}$$

Ce qui implique que les anneaux brillants sont de rayon $r_i = \sqrt{2i\lambda_0 l}$.

Si l'on éclaire maintenant ces anneaux avec une longueur d'onde différente on peut trouver ce qui se passera par le raisonnement suivant : avec λ_0 on sait qu'on reformerait l'image exacte du point, à la distance l de la plaque ; avec λ_1 par simple renversement du temps dans le parcours de la lumière on peut dire qu'on reformera l'image d'un point, celui qui aurait donné lieu à ces franges en anneaux s'il avait été enregistré à cette longueur d'onde. Or le point donnant lieu à des anneaux de rayons $r_i = \sqrt{2i\lambda_0 l}$ sous λ_1 est à une distance l_2 de la plaque telle que $\lambda_0 l = \lambda_1 l_2$, pour retrouver le même rayon.

On reformera donc par ce procédé l'image de l'hypothétique point à une distance l_2 . D'où on en déduit en généralisant à un objet non ponctuel quelconque vu comme étant un ensemble de points, que la restitution de l'hologramme faite avec une longueur d'onde différente modifie les longueurs de l'objet en respectant $\lambda d = \text{constante}$.

Ceci peut être vérifié expérimentalement, et donne lieu à des phénomènes intéressants, comme par exemple la possibilité d'observer un hologramme sous une lampe qui serait non pas monochromatique mais qui présenterait des raies discrètes fines et assez espacées. On voit de cette manière plusieurs images de couleurs et de tailles différentes, chacune restituée par une des raies du spectre.

On comprend donc que la condition pour pouvoir restituer l'hologramme n'est pas nécessairement d'avoir un éclairage monochromatique mais simplement de ne pas avoir un continuum de fréquences car sinon toutes les images se chevauchent et se brouillent. On peut donc tout à fait observer un hologramme par transmission avec une lampe à vapeur de mercure.

4.4 Chimie du développement argentique

Nous souhaitons à travers ce court paragraphe, exposer rapidement les réactions chimiques qui ont lieu lors du développement d'une émulsion d'halogénure d'argent. Cependant bien que l'intégralité de ce rapport a pour sujet l'holographie, nous nous appuyons sur le développement argentique d'un film négatif, il est fort probable qu'il y ait d'autres réactions à prendre en compte dans le cas du développement d'une plaque holographique. Le point commun est le composant d'halogénure d'argent.

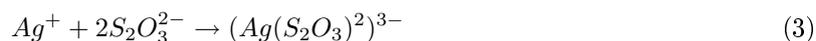
Durant la phase d'exposition les atomes d'argent présent sur la pellicule se réduisent par la lumière en suivant l'équation :



Par conséquent nous avons apparition d'argent métallique.

Le révélateur employé pour le développement est une solution aqueuse contenant de l'hydroquinone -réducteur. Cette solution réactive, en quelque sorte le processus déclenché par la lumière lors de l'exposition, dans les particules où de l'argent métallique s'est déjà formé. L'image latente apparaît donc peu à peu par formation de grains d'argent de diamètre plus important. Afin d'arrêter l'action du révélateur, le film est ensuite plongé dans un bain légèrement acide, neutralisant l'alcalinité du révélateur.

Après ce bain d'arrêt, l'image négative est fixée : dissolution des monocristaux d'halogénures d'argent par complexation avec des ions thiosulfates (agent fixateur) et stabilisation des particules d'argent métallique.



Le complexe formé lors de cette réaction est soluble dans l'eau. La dernière étape consiste donc à rincer longuement le film à l'eau claire pour éliminer tout dépôt résiduel du fixateur qui pourrait endommager les négatifs avec le temps.

Cette phase de développement permet d'obtenir un négatif où seules subsistent les particules d'argent métallique de coloration noire.

5 Références

- Quelques sites nous ayant servi lors de ce projet, pour la compréhension ou la rédaction du rapport :
- http://crteknologies.free.fr/projets/olympiades_holographie/
 - <http://vannator.leroi.free.fr/>
 - <http://hologrammes.tpe.free.fr/>
 - physique-eea.ujf-grenoble.fr/intra/Organisation/CESIRE/OPT/DocsOptique/Notices/NoteHoloRefl.pdf