

# Holographie et Interférométrie



*Maxim Berman - TIPE 2010*

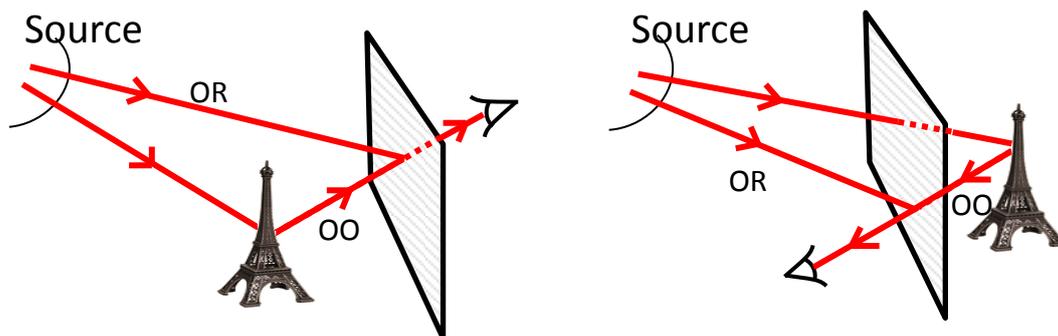
*Du grec holos "en entier" et gramma "écriture", l'hologramme est un support capable de restituer par diffraction une image tridimensionnelle d'un objet réel. En m'intéressant aux principes physiques et en expérimentant par moi-même la réalisation d'hologrammes, j'ai constaté que l'holographie était plus qu'une curiosité scientifique connue du grand public, et disposait d'un vaste champ d'applications dans des domaines scientifiques de pointe. En effet, grâce au perfectionnement du laser depuis les années 60, l'holographie a su se créer une place de choix dans le domaine de la mesure de déplacements et de déformations. Elle est amenée à jouer prochainement un rôle plus important dans la recherche et l'industrie, avec l'émergence des mémoires holographiques.*

## **Plan**

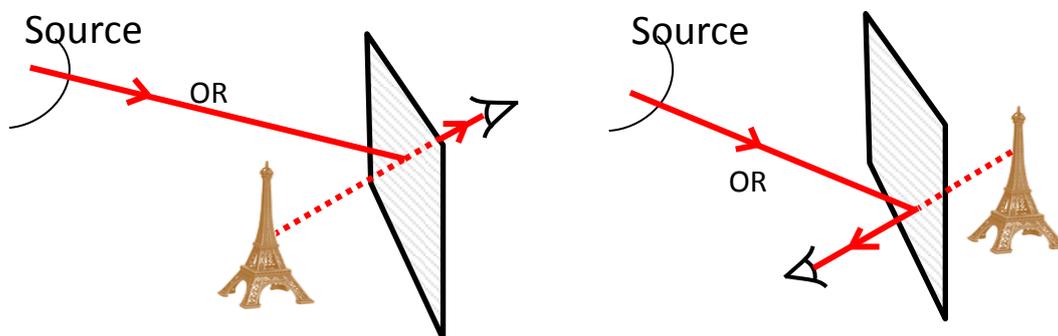
PRINCIPE .....	2
MODELISATION.....	3
Enregistrement .....	3
Restitution.....	4
Interférométrie holographique.....	5
EXPERIENCES REALISEES.....	6
Hologrammes.....	6
Interférométrie .....	8
CONCLUSION .....	9
BIBLIOGRAPHIE .....	9
Plaques holographiques utilisées.....	9

## PRINCIPE

Une source laser éclaire un objet. On fait interférer sur une plaque photosensible l'onde provenant du laser (OR) avec l'onde réfléchie par l'objet (OO). On enregistre ainsi sur la surface de l'hologramme la figure d'interférence de ces deux ondes. Après développement de la plaque, on obtient un réseau optique constitué par cette figure d'interférence.



OR : Onde de Référence. OO : Onde Objet. On obtient un réseau en transmission (à droite) ou en réflexion (à gauche) suivant le placement de l'objet par rapport à l'onde de référence.



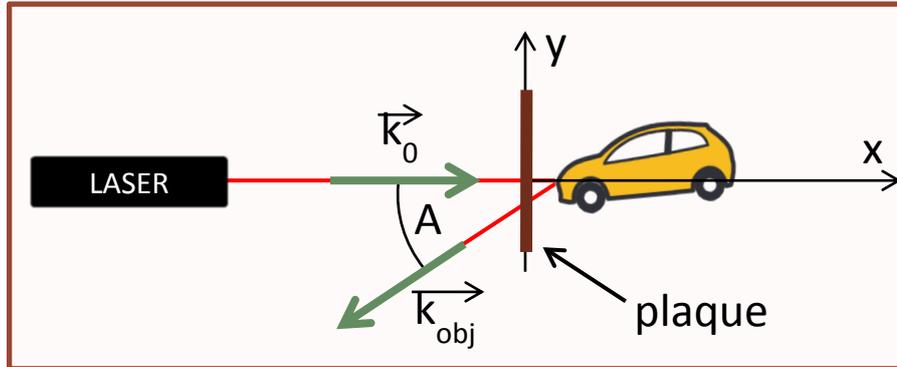
Après avoir développé l'hologramme, on éclaire l'hologramme dans la même configuration géométrique que durant l'exposition.

Une fois éclairé par une source lumineuse avec la même configuration géométrique qu'à l'enregistrement, ce réseau diffracte la lumière et émet dans la direction d'observation une onde lumineuse semblable à l'onde qui provenait de l'objet pendant l'enregistrement. L'observateur peut donc voir l'objet à travers l'hologramme comme s'il était encore présent, dans un certain volume de l'espace. En particulier, la perception du relief est conservée : l'objet est observable en trois dimensions.

## MODELISATION

Pour simplifier les calculs, je présente ici un modèle bidimensionnel du phénomène : l'hologramme est donc réduit à un segment de droite.

## Enregistrement



Amplitude complexe de l'onde de référence OR :  $S_0 = A_0 e^{-i\vec{k}_0 \cdot \vec{r}}$

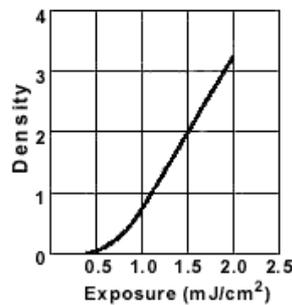
Amplitude complexe de l'onde réfléchi par l'objet OO :  $S_{obj} = A_{obj} e^{-i\vec{k}_{obj} \cdot \vec{r}}$

Dans le plan xOy, et si le laser est en incidence normale :  $\vec{k}_0 = k_0 \vec{u}_x$  et  $\vec{r} = r \vec{u}_y$

Donc  $S_0 = A_0$  et  $S_{obj} = A_{obj} e^{i.k_0.y \sin A}$

On a de plus, au point P(y) de la plaque :  $S_P = S_0 + S_{obj}$  et  $I_P = S_P \cdot S_P^*$

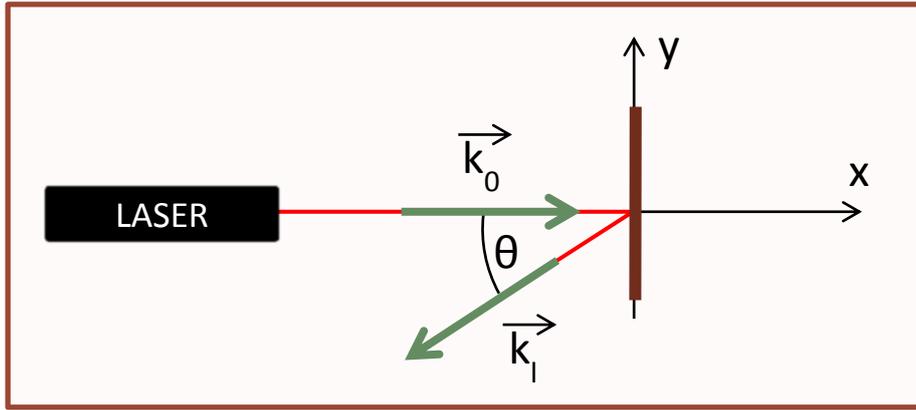
La transparence de la plaque après développement va être fonction de l'intensité  $I_p$  reçue au point P. Voici l'allure de la caractéristique des plaques que j'ai utilisées, en fonction de l'énergie reçue pendant l'exposition :



On se place dans l'approximation d'une réponse linéaire de la plaque. Après développement, la transparence au point P(y) est donc proportionnelle à :

$$t(P) \propto |A_{obj}|^2 + |A_0|^2 + A_0^* A_{obj} e^{i.k_0.y \sin A} + A_0 A_{obj}^* e^{-i.k_0.y \sin A}$$

## Restitution



Amplitude élémentaire diffractée au point P(y) dans la direction  $\theta$  :  $dS(y, \theta) \propto t \cdot S_0 \cdot e^{-i \cdot k_0 \cdot \sin \theta} \cdot dy$

Et en sommant sur tout l'hologramme :  $S(\theta) = \int_{y=-L/2}^{y=L/2} dS(y, \theta)$

D'après l'expression obtenue à la sous-partie précédente :

$$dS(y, \theta) \propto |A_{obj}|^2 + |A_0|^2 + A_0^* A_{obj} e^{i \cdot k_0 \cdot y \sin A} + A_0 A_{obj}^* e^{-i \cdot k_0 \cdot y \sin A} e^{-i \cdot k_0 \cdot \sin \theta} \cdot dy$$

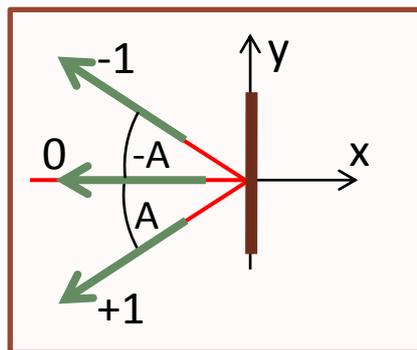
On obtient après intégration:  $S(\theta) \propto \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_{-1}$

$$\text{avec } \Phi_0 = (|A_{obj}|^2 + |A_0|^2) \cdot L \cdot \text{sinc } k_0 \frac{L}{2} \sin \theta$$

$$\Phi_{-1} = A_0 \cdot A_{obj}^* \cdot L \cdot \text{sinc } k_0 \frac{L}{2} (\sin \theta + \sin A)$$

$$\Phi_1 = A_0^* \cdot A_{obj} \cdot L \cdot \text{sinc } k_0 \frac{L}{2} (\sin \theta - \sin A)$$

Les trois termes obtenus représentent les ordres de diffraction : 0, -1 et +1 du réseau. Ils sont visibles au voisinage de l'angle qui annule l'argument du sinus cardinal (respectivement 0, -A et +A).



Directions au voisinage desquelles les trois ordres du réseau sont visibles.

L'ordre +1 contient l'information intéressante ici : on voit que pour  $\theta \approx A$ , celui-ci correspond à une onde  $S'_1$  émise dans la direction de  $\vec{k}_{obj}$ , vecteur d'onde provenant de l'objet pendant l'exposition :

$$S'_1 = A_0^* \cdot L \cdot A_{obj} e^{-i \cdot \vec{k}_{obj} \cdot r} = A_0^* \cdot L \cdot S_{obj}$$

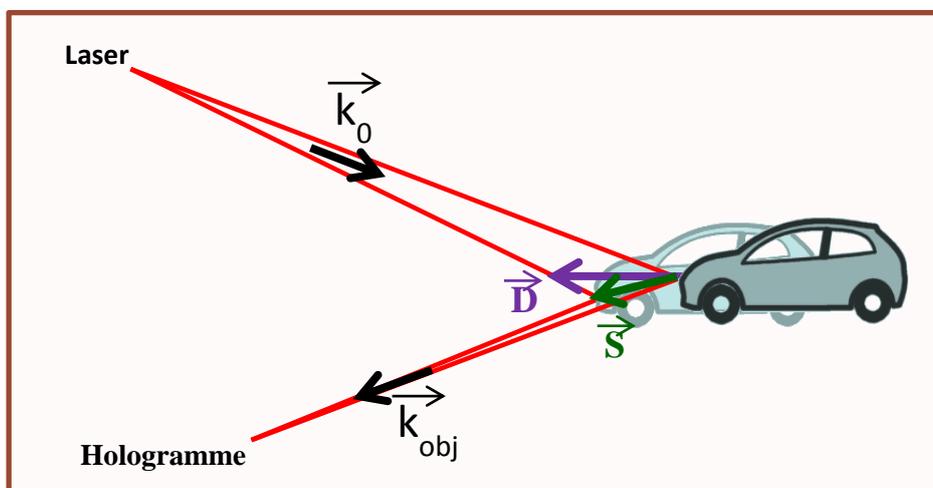
$S'_1$  est donc, à un facteur près, égale à l'onde provenant de l'objet durant l'exposition : ceci correspond bien au phénomène holographique. L'observateur perçoit l'image de l'objet à travers l'image diffractée par l'hologramme.

## Interférométrie holographique

### Le procédé

Le moindre mouvement de l'objet durant l'exposition de l'ordre de la demi-longueur d'onde du laser utilisé (donc de l'ordre du demi-micromètre) décale les franges de la figure d'interférence enregistrée par l'hologramme et rend l'hologramme inutilisable. Il est possible de tirer parti de ce phénomène pour réaliser des mesures de déformations : on parle d'interférométrie.

On procède de la façon suivante : on expose une fois l'hologramme à l'objet, puis on déforme l'objet, et enfin on réalise une deuxième exposition sur le même hologramme. Le réseau holographique sera alors constitué des deux figures d'interférences superposées, et on observe après développement la superposition des deux ondes diffractées par ces figures. Si l'amplitude du mouvement est trop élevée (plusieurs centaines de longueurs d'ondes), cette superposition se traduit par des interférences destructives (déphasages aléatoires entre les deux images). Si le mouvement est de l'ordre de la longueur d'onde, les deux images interfèrent : des franges apparaissent. La mesure de la période spatiale de ces franges permet d'évaluer l'amplitude du mouvement des différents points de l'image. Quand on passe d'une frange à l'autre, le déplacement varie d'environ  $0,3 \mu\text{m}$  ( $\lambda/2$  avec  $\lambda = 650 \text{ nm}$  pour le laser que j'ai utilisé).



$D$  : vecteur déplacement.  $S = k_0 - k_{obj}$  : vecteur sensibilité. L'amplitude du mouvement est exagérée par rapport à la distance du laser et de l'hologramme : on considère que  $k_0$  et  $k_{obj}$  sont constants.

La différence de chemin optique entre les deux trajets vaut :  $\delta = \vec{D} \cdot (\vec{k}_{obj} - \vec{k}_0) = \vec{D} \cdot \vec{S}$

On peut donc observer au moyen des franges d'interférences la projection du vecteur déplacement sur le vecteur sensibilité  $S$ , soit une composante du déplacement. La géométrie du montage doit donc être choisie de telle sorte que les déformations attendues se produisent dans une direction connue proche de la direction de ce vecteur.

### *Les avantages*

L'interférométrie holographique présente plusieurs avantages :

- elle permet une grande précision de mesure, sans qu'il y ait besoin de détériorer ou même de toucher l'objet.
- Elle permet de mesurer l'amplitude du mouvement de plusieurs zones de l'objet de manière simultanée.

De plus, l'utilisation d'un laser à impulsion permet de s'affranchir de l'impératif d'immobilité de l'objet pendant la pose. Un tel laser est capable d'envoyer deux faisceaux successifs de haute énergie, séparés d'un intervalle de temps de plusieurs microsecondes, chacun durant quelques nanosecondes. En écrivant la condition  $\Delta d < \lambda / 4$  pendant l'exposition (décalage des franges négligeable) on voit qu'il est possible de mesurer les déformations d'un objet se déplaçant à une centaine de mètres par seconde.

### *Les limites*

L'usage des plaques holographiques coûteuses, ne pouvant être utilisées qu'une fois, est le principal défaut du procédé. A cela s'ajoute la difficulté de fabriquer des lasers assez puissants pour l'étude de structures de grande taille.

Les cristaux photoréactifs mis au point récemment permettent de s'affranchir du problème de support. Ils jouent le rôle de supports optiques pouvant stocker de nombreuses figures d'interférences holographiques de manière effaçable et réinscriptible. C'est une avancée conséquente pour l'interférométrie, mais également pour le stockage d'informations : les disques holographiques pourraient ainsi remplacer les disques lasers traditionnels dans les dix ans à venir.

## **EXPERIENCES REALISEES**

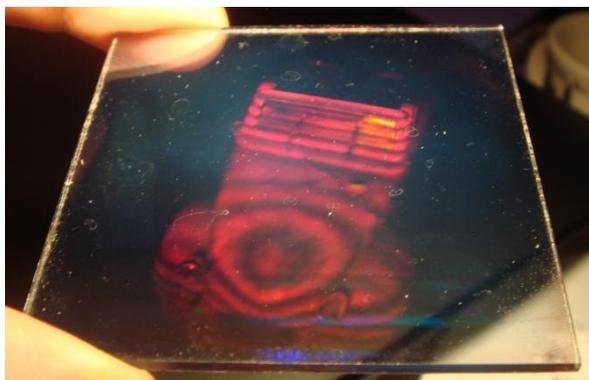
### **Hologrammes**

J'ai réalisé en tout 25 hologrammes dont 15 ont donné des résultats concluants. Mes efforts se sont focalisés sur la fabrication d'hologrammes en réflexion : les plaques holographiques dont je disposais étaient spécifiquement conçus pour cette utilisation. Un hologramme en réflexion permet d'autre part une lecture confortable puisqu'il est visible en lumière blanche.

Les plaques holographiques, et la diode laser que j'ai utilisées dans un premier temps, m'ont été fournies par une société citée en bibliographie, ainsi que les produits chimiques nécessaires au développement.



Mon premier hologramme a été un tas de pièces, avec la plaque directement posée sur les pièces. Ce fut un succès. J'ai alors voulu passer à des géométries un peu plus complexes, mettant plus en évidence la perception de relief. En écartant les quelques essais qui n'ont donné aucune image (sans doute dû à des vibrations) et ceux qui n'ont pas été correctement développés (présence d'une « tâche » clairement dû à une mauvaise répartition des solutions sur la plaque), le problème majeur que j'ai rencontré a été celui de l'apparition sur tous mes hologrammes de franges horizontales, faisant penser à des figures d'interférences.



Voiture avec franges horizontales



Tour Eiffel « cassée » par les franges

Des mouvements durant les expositions m'ont d'abord semblé être la cause de ces interférences. Néanmoins de nouvelles tentatives avec un plus grand effort d'isolation vibratoire (notamment à l'aide d'une table optique disponible au lycée) ont donné les mêmes résultats.

J'en suis venu à incriminer la diode laser utilisée. En effet ce type de laser, très sensible à la température, peut facilement « sauter » d'un mode de fonctionnement à un autre, et donc émettre sur plusieurs fréquences. Si ces différentes fréquences sont incohérentes au moment de l'exposition, lors de la lecture de l'hologramme, il se peut que la source d'éclairement donne lieu à deux images diffractées interférant entre elles.

L'étude de la polarisation de la lumière émise par la diode (les deux fréquences pouvant éventuellement avoir des polarisations différentes) n'a pas permis d'identifier ce phénomène. L'étude des interférences produites par un interféromètre de Michelson en lame d'air, elle, a bien mis en évidence la coexistence de plusieurs modes, avec apparition de brouillages successifs.

L'utilisation d'un laser He-Ne du lycée, dont j'ai fait passer le faisceau à travers un épurateur de faisceau, a entraîné la disparition des franges parasites.

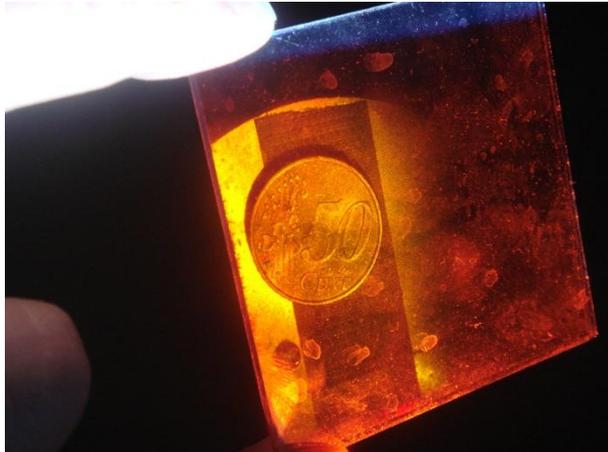


Hologramme de voiture réalisé avec le laser « stable »

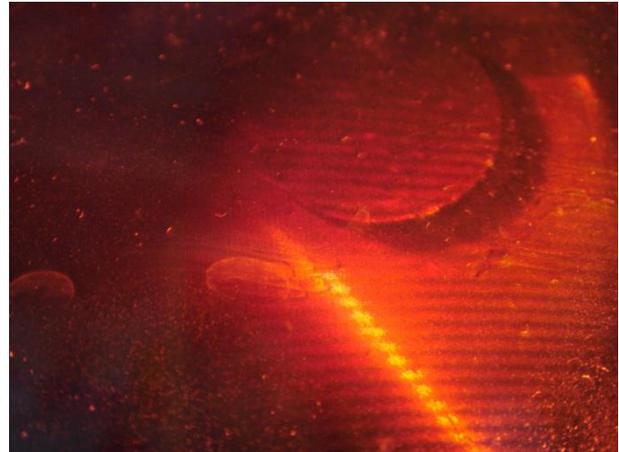
## Interférométrie

Une fois les problèmes de création d'hologrammes résolus, j'ai consacré plusieurs essais à la mise en évidence de la technique d'interférométrie.

Mon premier essai, avec déplacement d'une plaque posé sur trois vis de contrôle de position, a donné un bon résultat.

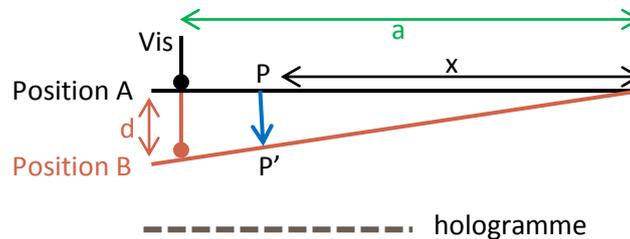


Hologramme réalisé sans déplacement



Interférogramme réalisé par double exposition après vissage d'une vis

Pour évaluer l'ordre de grandeur du déplacement, j'ai modélisé celui-ci de la façon suivante :



Plaque avant et après déplacement – paramétrage du mouvement

En comparant la taille de l'interfrange observée à la taille de la pièce observée (la pièce donnant l'échelle), on mesure un interfrange de 1,2 mm. Pour les petits angles,  $PP' = x \frac{d}{a}$ . Donc en écrivant la condition  $2 \cdot PP' = k \cdot \lambda$ ,  $k \in \mathbb{Z}$ , on obtient un interfrange de  $\frac{\lambda \cdot a}{2 \cdot d}$ . Avec  $a = 8$  cm,  $\lambda = 650$  nm, la vis a donc dû être déplacée de  $d = 20$   $\mu$ m.

J'ai tenté quelques autres configurations de déformations : j'ai voulu mesurer la déformation d'une plaque due à un poids, et également la dilatation d'une résistance due à l'effet joule. Les hologrammes n'ont rien donné, sans doute à cause de vibrations extérieures à la déformation.

## CONCLUSION

Malgré les nombreuses pellicules gâchées par des essais défailants, c'est avec satisfaction que j'ai mené ces expériences passionnantes. Celles-ci montrent que des phénomènes physiques relativement simples à mettre en œuvre et à modéliser peuvent interagir pour donner lieu à des objets complexes, qui échappent à l'intuition. L'interférométrie holographique est difficile à mettre en œuvre de façon « artisanale », sans laser pulsés ou dispositifs d'isolation vibratoire poussés. Néanmoins, plusieurs de mes hologrammes ont mis en évidence le potentiel de cette technique : de façon involontaire d'abord, puisque c'est bien des figures d'interférences que l'on observe dans mes premiers hologrammes, et de façon provoquée avec le mouvement de la plaque que j'ai mis en œuvre.

## BIBLIOGRAPHIE

Graham Saxby, *Practical Holography*, Institute of Physics Pub., Bristol, 2004.

Paul Smigielski, *Holographie optique Interférométrie Holographique*, Techniques de l'ingénieur, réf. R6330, 2001, <http://www.techniques-ingenieur.fr/>

Cours *Holographic Interferometry* de l'université d'Edimbourg

Gilles Pauliat, Gérald Roosen, *Mémoires holographiques de volume par codage en phase*, Images de la physique 1997, p.95

Pascal Picart, Cours *Holographie : Enregistrement / Reconstruction*, Université du Maine, [http://prn1.univ-lemans.fr/prn1/siteheberge/optique/M10G1\\_PPicart/](http://prn1.univ-lemans.fr/prn1/siteheberge/optique/M10G1_PPicart/)

Le forum d'entraide à la création d'hologrammes Holography Forum, <http://www.holographyforum.org/>

### Plaques holographiques utilisées

Plaques PFG-03M fabriquées par la société Slavich, <http://www.slavich.com>, et fournies par la société Integraf, <http://www.holokits.com>