

Holographie numérique

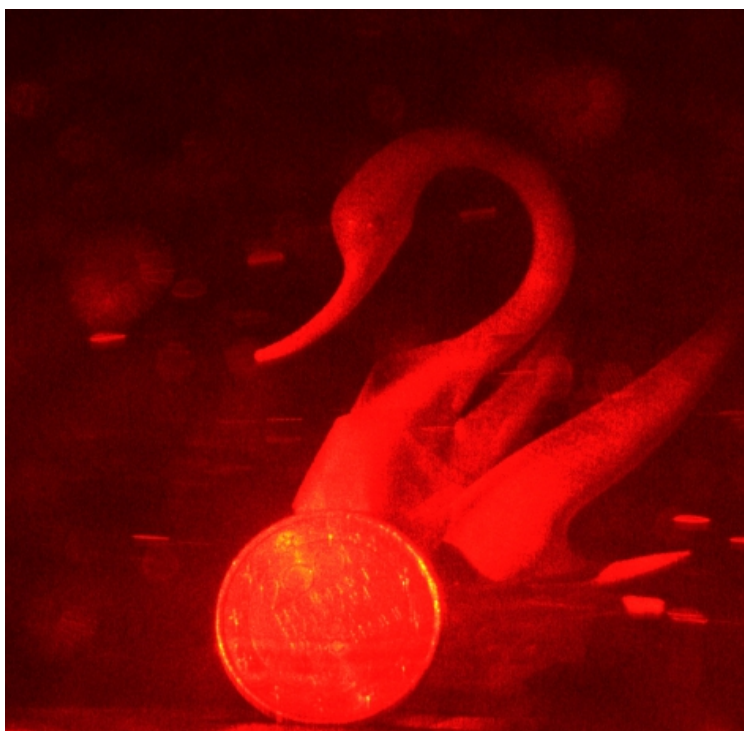


Table des matières

I. Introduction.....	2
I.1.Définition Holographie:.....	2
I.2.principe de l'holographie:	3
a)montage optique:.....	3
b)Capteur CCD (holographie numérique) :.....	3
c)plaque photosensible (holographie optique) :.....	4
II. Holographie numérique d'un point.....	4
II.1.prévisions théoriques.....	4
II.2.contraintes et problèmes expérimentaux.....	6
II.3.-résultats expérimentaux.....	6
III. Holographie d'un objet complexe	7
III.1.-holographie numérique classique.....	7
III.2.-triangulation.....	8
Annexe : holographie optique d'un objet complexe.....	9
Remerciements & références.....	10

I. Introduction

I.1. Définition Holographie:

L'holographie a pour origine les mots grecs «holos» et «graphein» qui signifient «entier» et «écrire».

L'holographie est un procédé permettant de réaliser l'image tridimensionnelle exacte de l'apparence de l'objet représenté, grâce à l'enregistrement de l'amplitude et de la phase provenant de l'objet.

Le grand principe de l'holographie est d'utiliser une lumière cohérente, de la séparer en deux faisceaux: l'un éclairera l'objet, l'autre servira d'onde de référence. Les interférences créées au niveau du plan d'acquisition résultent de la superposition des 2 faisceaux. La réalisation d'un hologramme nécessite 2 étapes: L'acquisition (enregistrement de l'intensité) puis la restitution (visualisation de l'objet en 3D).

L'acquisition se fera dans les 2 cas en éclairant un capteur photosensible:

★ L'holographie optique permet d'enregistrer les interférences créées par les 2 ondes sur une plaque photosensible. Cette plaque est composée de cristaux d'une dizaine de nm de largeur.

★ L'holographie numérique utilise un capteur CCD afin d'enregistrer les interférences. Les pixels ont une largeur de quelques μm .

La restitution de l'image se fera différemment selon le type d'holographie.

★ En optique, c'est l'œil qui fait le travail de restitution de l'image. Il suffira de se placer derrière la plaque photosensible éclairée par l'onde de référence pour apercevoir l'image virtuelle de l'objet.

★ En numérique c'est un logiciel qui doit effectuer le travail de l'œil. Celui-ci, en fait, réalise une transformée de Fourier de l'image.

Caractéristiques:

★ L'holographie optique permet de créer une image virtuelle, en 3 dimensions, visible directement à l'œil nu. La petite taille des cristaux des plaques photographiques permet d'«holographier» des objets de grandes dimensions angulaires. C'est le principal avantage de l'holographie optique.

★ En revanche l'holographie numérique offre un support numérique facilement duplicable permettant un traitement numérique en vue de la reconstruction en 3 dimensions de l'objet.

I.2.principe de l'holographie:

a) montage optique:

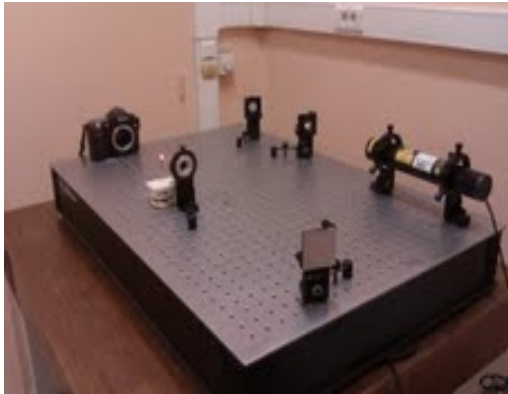


Photo du montage

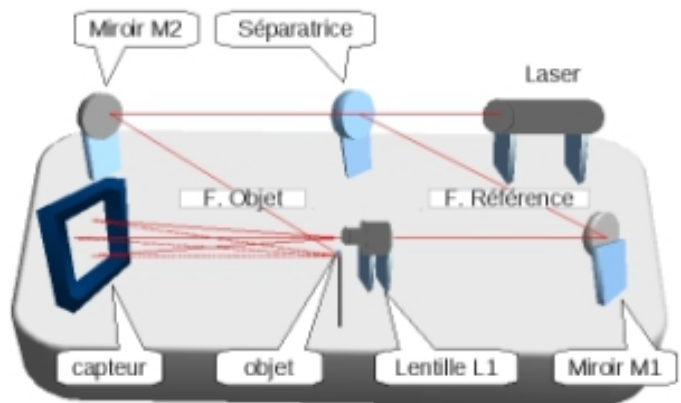


Fig 1

Montage réalisé à l'aide du matériel de TP du master oméga sur l'holographie.

Un laser envoie un faisceau lumineux à travers une séparatrice 90/10.

10% du faisceau emprunte le chemin 1: on l'appellera faisceau de référence.

90% du faisceau emprunte le chemin 2: on l'appellera faisceau objet.

Chemin 1 : le faisceau est dévié par le miroir M1 puis traverse la lentille divergente L1 de focale 5 mm afin de créer une onde sphérique qui éclairera le capteur.

Chemin 2 : le faisceau est dévié par le miroir M2 et se réfléchit sur l'objet.

(pour un objet dont les dimensions dépassent celles du faisceau, on peut faire diverger le faisceau à l'aide d'une lentille et ainsi éclairer la totalité de l'objet).

Capteur : il permet l'enregistrement de la superposition de l'onde de référence et de la lumière réfléchi par l'objet. Chaque point d'un objet complexe renvoie une onde sphérique. L'ensemble de ces ondes sphériques interfère pour donner des franges. (Le calcul pour un objet ponctuel a été traité § II.1)

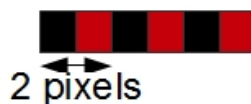
b) Capteur CCD (holographie numérique) :

nous avons utilisé un appareil photo Nikon D 80 :

caractéristiques:

- Dimensions du capteur: 23,6*15,6 mm
- Résolution de 3872 pixels sur la largeur, 2592 pixels sur la hauteur
- Taille des pixels: 6.1 μm

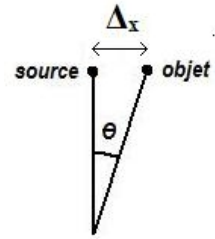
D'après le théorème de Shannon, il faut au minimum 2 pixels pour enregistrer une frange.



La taille minimale de l'interfrange est donc de $12,2\mu\text{m}$

l'inter-frange visible sur l'écran est donnée par la formule :

$$i = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda}{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad \text{dans notre cas } \theta \text{ est très petit donc } i = \frac{\lambda}{\theta}$$



✓ θ = angle apparent entre la source et l'objet depuis le centre du capteur.

✓ λ = longueur d'onde du laser = 6328\AA

on en déduit donc que θ doit être inférieur à $2,92^\circ$.

c) plaque photosensible (holographie optique) :

Caractéristiques: le principe est le même que pour le capteur CCD; les cristaux remplacent les pixels.

La taille des cristaux est de l'ordre d'une dizaine de nanomètres.

On en déduit des calculs précédents que, même pour des angles élevés (ex: $\theta = 60^\circ$), nous pouvons toujours échantillonner correctement les franges d'interférences. (~ 50 cristaux / interfranges)

L'holographie optique nécessite comme la photographie traditionnelle des plaques photographiques et des bains chimiques pour le développement.

II. Holographie numérique d'un point

L'holographie d'un point est une étape de départ importante de l'holographie numérique, car un objet complexe n'est en fait que la somme d'un ensemble de points. Nous avons utilisé un objet en forme de tête d'épingle pour notre expérience.

II.1. prévisions théoriques

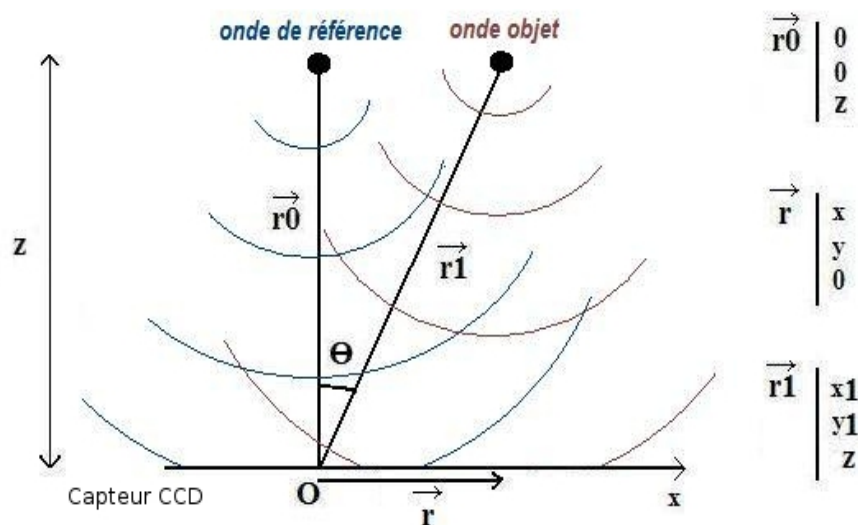


Fig 2: Schématisation de l'expérience

on note: $x^2 + y^2 = \rho^2$ et $(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = \rho_1^2$

- ✓ λ : Longueur d'onde du laser
- ✓ (x,y) : la position d'un point sur la plan du capteur photosensible mesuré depuis le centre du capteur.
- ✓ z : La distance entre la source et le capteur photosensible. Nous considérerons que l'objet et la source sont à la même distance.
- ✓ Ψ_1 et Ψ_2 l'amplitude des 2 ondes supposée réelle pour simplifier l'écriture.

L'onde venant de la source de référence a une équation du type:

$$\Psi_R = \frac{\Psi_1}{z} e^{\frac{2i\pi z}{\lambda}} e^{\frac{i\pi(\rho^2)}{\lambda z}}$$

L'onde venant de la source objet a une équation du type:

$$\Psi_o = \frac{\Psi_2}{z} e^{\frac{2i\pi z}{\lambda}} e^{\frac{i\pi(\rho_1^2)}{\lambda z}}$$

Les interférences créées ressemblent à une mire dont l'équation est:

$$I = |\Psi_R + \Psi_o|^2 = \frac{\Psi_1^2}{z^2} + \frac{\Psi_2^2}{z^2} + \frac{2(\Psi_1 \Psi_2)}{z^2} \cos\left(\frac{\pi}{\lambda \cdot z} \left(2 \cdot (x_1 \cdot x + y_1 \cdot y) - y_1^2 - x_1^2\right)\right)$$



Fig3 : Exemple de franges simulées pour $x_1=5\text{mm}$, $y_1=2\text{mm}$, $z=0.4\text{m}$.
L'interfrange est de $46\mu\text{m}$

Les interfranges sont donc données par le terme : $\frac{2}{\lambda \cdot z} (x_1 \cdot x + y_1 \cdot y)$

Restitution: Dans le cas de l'holographie optique, l'intensité $I(x,y)$ est enregistrée par la plaque photosensible dont le coefficient de transmission, après développement, est proportionnel à l'intensité enregistrée. Une fois cette plaque éclairée par l'onde de référence, l'oeil, placé derrière, forme sur la rétine une image qui est la T.F. de l'amplitude en sortie de l'hologramme (proportionnelle à $I(x,y)$); c'est une propriété des lentilles convergentes comme le cristallin.

Le calcul de la T.F. Dans le cas d'un objet ponctuel donne:

$$\hat{I}(u, v) = \frac{\Psi_1^2 + \Psi_2^2}{z^2} \delta(u, v) + \frac{\Psi_1 \Psi_2}{2z^2} \left(\delta\left(u - \frac{x_1}{\lambda z}, v - \frac{y_1}{\lambda z}\right) + \delta\left(u + \frac{x_1}{\lambda z}, v + \frac{y_1}{\lambda z}\right) \right)$$

on doit donc obtenir une transformée de Fourier de l'image avec 3 taches:

une à l'origine, une en $\left(\frac{-x_1}{\lambda z}, \frac{-y_1}{\lambda z}\right)$ et une en $\left(\frac{x_1}{\lambda z}, \frac{y_1}{\lambda z}\right)$.

II.2. contraintes et problèmes expérimentaux

Contraintes du montage:

- ✓ la différence entre les longueurs des chemins 1 et 2 doit être inférieure à la longueur de cohérence du laser (30cm) pour observer des interférences.
- ✓ éviter les speckles : utilisation d'une « bille » polie pour avoir une onde sphérique réfléchi la plus nette («propre») possible.

II.3.-résultats expérimentaux

La source et la tête d'épingle sont dans le même plan et distante de 3,5 mm. Ce plan est à $z=40$ cm du capteur CCD.

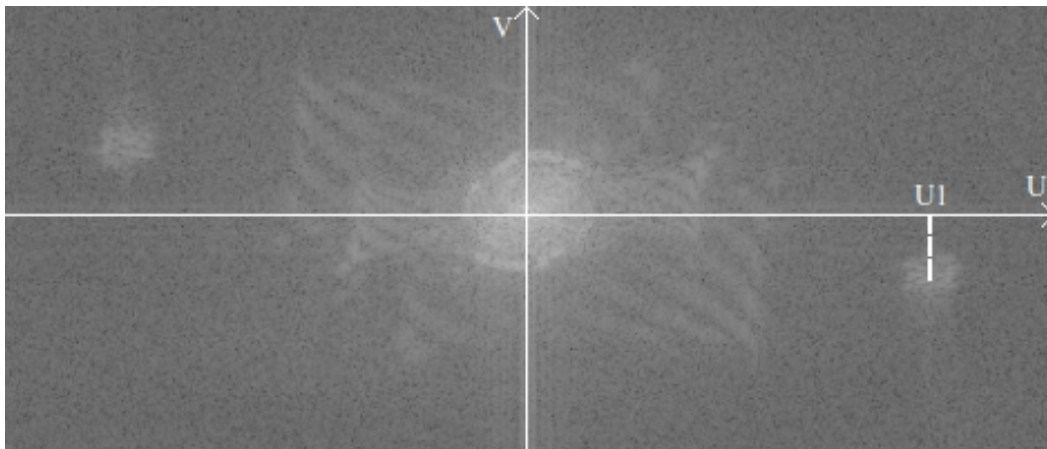


Fig 4: Module de la transformée de Fourier d'un hologramme numérique d'un objet ponctuel

Comme prédit par la transformée de Fourier nous observons 3 taches. Les deux taches correspondent à deux images de l'objet ponctuel. A partir de l'écart entre la tache à l'origine et la tache latérale nous pouvons retrouver la distance Δ_x séparant l'objet ponctuel de la source.

$$\theta_{1x} = 2U_1 \lambda \quad \text{A.N. } \theta_{1x} = 0,095 \text{ rad.} \quad \Delta_x = 0,4 * \tan(\theta) = 3,8 \text{ mm}$$

La valeur mesurée sur le trombone étant 3,5mm +/-1mm, on peut conclure que cette méthode permet de retrouver les dimensions de l'objet dans le plan parallèle au capteur.

III. Holographie d'un objet complexe

On s'intéresse maintenant à des objets plus complexes, nous avons choisi un trombone. Celui-ci se comporte comme un ensemble de points. L'étude d'un objet en 3 dimensions nous permettra de montrer que l'holographie numérique permet aussi d'obtenir les 3 dimensions d'un objet.

III.1.-holographie numérique classique

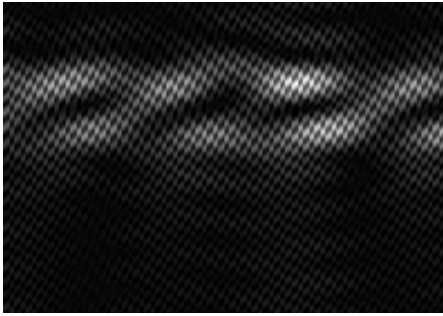


Fig 5: Hologramme simulé du trombone



Fig 5b: Hologramme du trombone

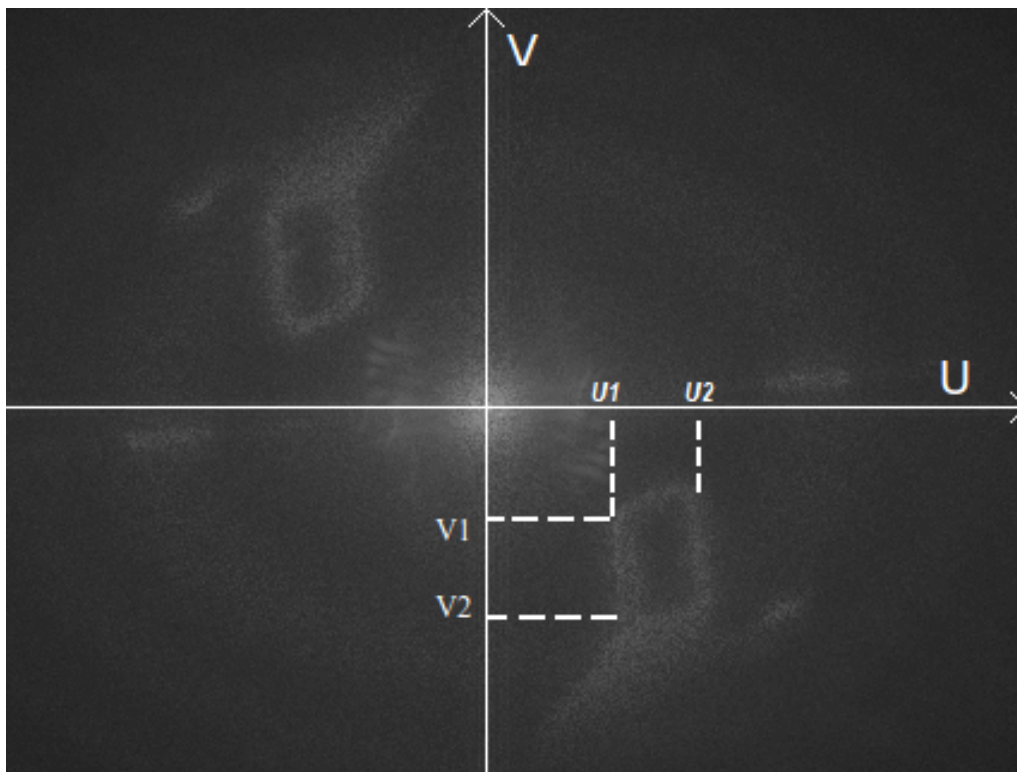


Fig 6: Transformée de Fourier de l'hologramme numérique d'un trombone.

Sur la figure 6 nous apercevons 2 fois l'image virtuelle du trombone ainsi que la tache centrale correspondant à la source.

III.2.-triangulation

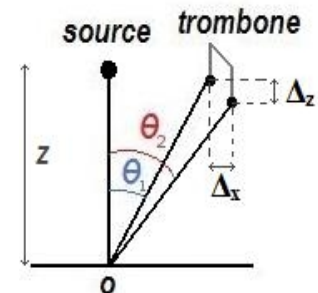
Nous allons montrer dans ce paragraphe qu'il est possible de retrouver les 3 dimensions d'un objet dont la profondeur est faible devant z, simplement à l'aide d'une seule photographie et de la distance z séparant le capteur CCD de l'objet.

En utilisant la totalité des interférences capturées par le capteur CCD, nous pouvons déjà définir les dimensions de l'objet dans le plan parallèle au capteur.

U_1 (resp. U_2) est la distance entre la tache centrale et l'abscisse U_1 (resp. U_2)
 L la largeur du capteur ccd

$$\theta_1 = U_1 \lambda$$

$$\theta_2 = U_2 \lambda$$



l'on retrouve donc la longueur Δ_x de l'objet en faisant :

$$\Delta_x = z * (\tan(\theta_{1x}) - \tan(\theta_{2x}))$$

De même pour Y : $\Delta_y = z * (\tan(\theta_{1y}) - \tan(\theta_{2y}))$

A.N. : $\Delta_x = 1,5\text{mm}$ valeur mesurée à la règle $2\text{mm} \pm 1\text{ mm}$.

$\Delta_y = 4,1\text{mm}$ valeur mesurée à la règle $4\text{mm} \pm 1\text{ mm}$.

Pour un objet à faible angle apparent, la perspective sous laquelle est vue cet objet diffère d'une extrémité à l'autre du CCD. Donc en sélectionnant des portions de l'image aux deux extrémités du capteur, il est possible de voir 2 sous hologrammes (différents) et, en utilisant la triangulation, il est possible de retrouver les 3 dimensions de l'objet.

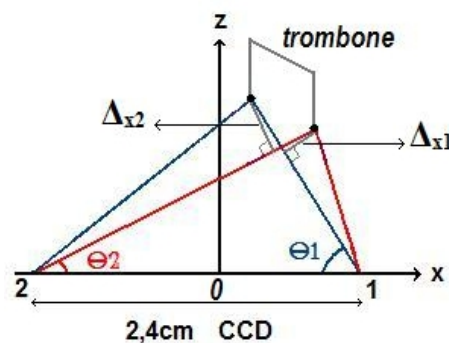
Dans le cas présent, la profondeur Δ_z du trombone se situe dans le plan XOZ.

Notons Δ_z la distance séparant 2 points de l'objet selon l'axe OZ.

Nous pouvons calculer Δ_z en projetant sur l'axe z la distance X apparente .

$$\Delta_z = \Delta_{x1} \cos(\theta_1) - \Delta_{x2} \cos(\theta_2)$$

A.N. $\Delta_z = 2,2\text{mm}$ La distance mesurée est de $2\text{mm} \pm 1\text{ mm}$.



On cherche à déterminer le plus précisément possible U_1 et U_2 , abscisse des branches du trombone (voir fig 6). Dans ce but, nous sommes environ 200 transformée de Fourier afin de diminuer le bruit aélatore puis nous effectuons une coupe horizontale (voir fig 7 et 8) sur laquelle les 2 pics correspondront à U_1 et U_2 .

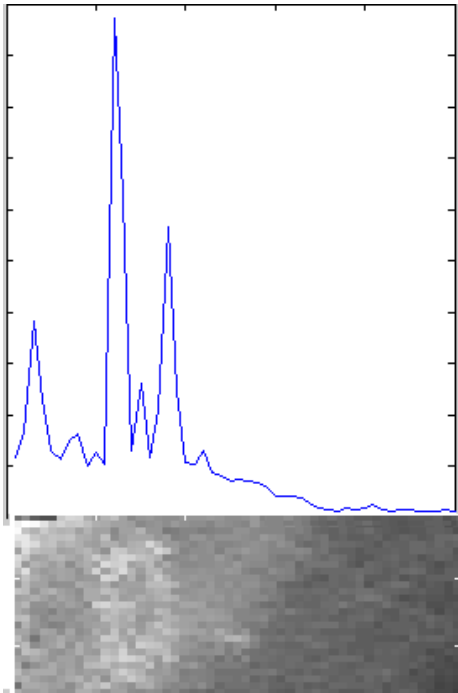


Fig 7: somme des transformées de fourier de la partie gauche des images capturées par le capteur CCD

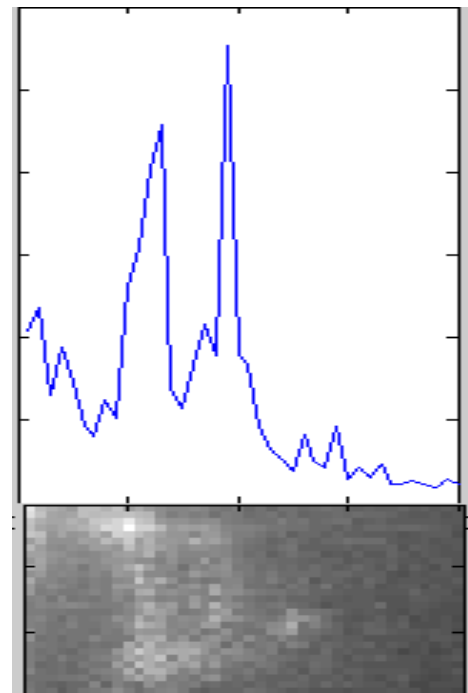


Fig 8: somme des transformées de fourier de la partie droites des images capturées par le capteur CCD

On peut s'apercevoir que les branches du trombone sont nettement plus visibles sur la coupe horizontale

Annexe : holographie optique d'un objet complexe

Holographie optique du trombone précédemment utilisé :

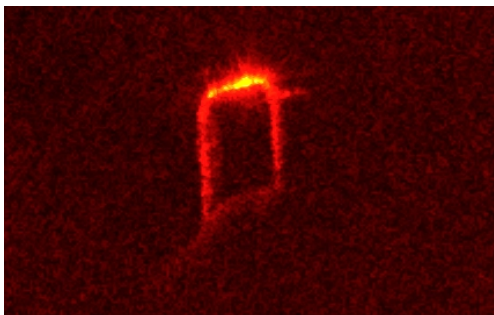


Photo 2: Hologramme optique du trombone



Photo 3: photo réelle du trombone

Nous avons fait l'holographie du trombone et d'un cygne en plastique:

A la place de la caméra CCD, nous plaçons une plaque photosensible ultimate08 4*5' (yves gentet).

Cette plaque permet d'« holographier » des objets de grandes dimensions angulaires comme le cygne.

On laisse un temps d'acquisition de 10 secondes dans le noir total.

On procède ensuite à un développement de la plaque photosensible:

- 6min dans un bain de révélateur à 20°
- 30 sec rinçage dans de l'eau
- 4min dans un bain de blanchiment

Pour observer l'hologramme il faut enlever l'objet, et éclairer la plaque photosensible avec l'onde de référence. Notre oeil aura l'impression d'apercevoir le cygne.

Pour photographier l'hologramme , nous avons placés derrière la plaque photosensible l'appareil photo avec un objectif puis avons pris en photo l'hologramme visible.

c'est un Hologramme optique. (Voir photo du cygne sur le sommaire + photo2)

Remerciements & références

Nous tenons à remercier l'ensemble du personnel du laboratoire H. Fizeau et plus particulièrement Hervé TRINQUET et Eric ARISTIDI.

Références :

- TP master oméga
- Cours d'optique de L3 Physique.
- Introduction à l'optique de Fourier et à l'holographie de Joseph W.Goodman. , Masson & cie, 1972
- Optical Holography (student edition) de Robert J.Collier, Christoph B.Burckhardt, Lawrence H.Lin, ACADEMIC PRESS, INC, 1971
- Cours sur l'holographie de l'université du mans :
- http://prn1.univ-lemans.fr/prn1/siteheberge/PublisCours-OPI/OPI_fr_M02_C10/co/Grain_OPI_fr_M02_C10.html