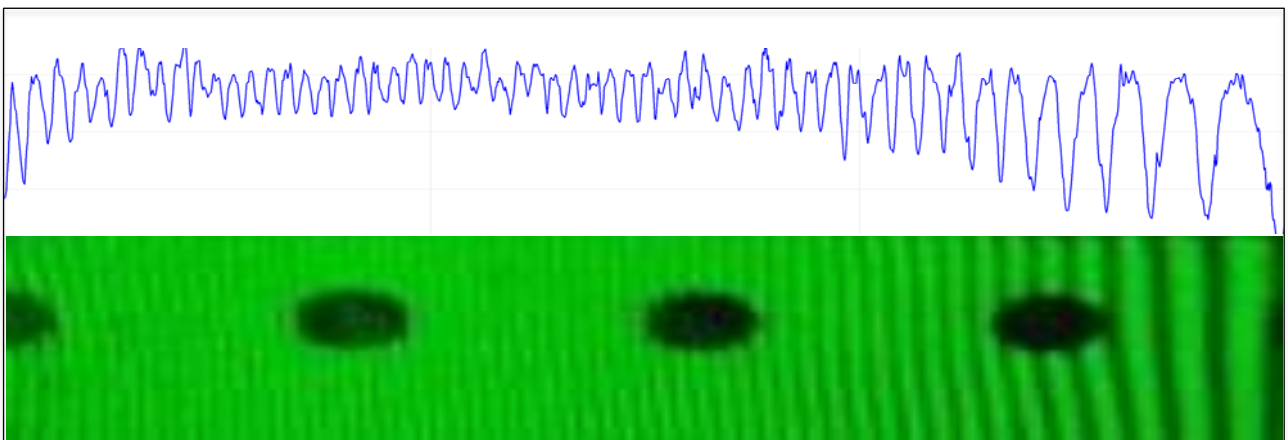


Du faux hologramme au vrai hologramme.

De l'holographie spectacle à l'holographie de mesure.

De la réalisation d'hologrammes décoratifs à l'application au contrôle de qualité.

Comment utiliser l'holographie de précision pour caractériser une déformation ?

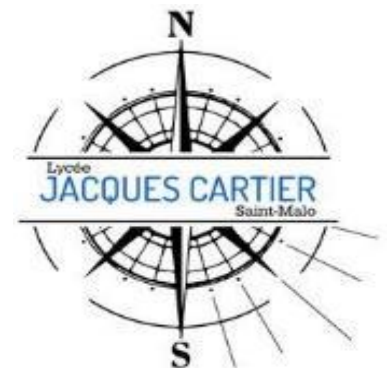


Élèves porteurs du projet :

- . Jade MAURANYAPIN
- . Marine PEUZET
- . Mathilde GOUIN
- . Méline DUROT

Professeur encadrant : Christian GUITARD

Enseignant-chercheur référent :
Thierry CHARTIER



ENSSAT
LANNION

Projet présenté le mercredi 31 janvier 2020, Université Paris-Diderot.

Sommaire

Résumé

PARTIE 1 : Des « faux » hologrammes aux « vrais » hologrammes

- 1.1. Au départ il y avait notre TPE...
- 1.2. Distinction entre faux et vrais hologrammes
- 1.3. Nos premiers vrais hologrammes à l'E.N.S.S.A.T. de Lannion

PARTIE 2 : À la découverte de l'holographie

- 2.1. Première visite à Lannion : découverte du principe de l'holographie
- 2.2. Principe des hologrammes
- 2.3. Modélisation du « fameux » hologramme avec franges d'interférences
- 2.4. Construction d'une méthode d'analyse
- 2.5. Application à notre modèle à l'hologramme en question

PARTIE 3 : Holographie au lycée

- 3.1. Deuxième visite à Lannion : formation et élaboration d'un autre montage
- 3.2. De retour au lycée, mise en pratique
- 3.3. Mise en application de notre méthode sur l'hologramme réalisé à Lannion
- 3.4. Un peu de réflexion : Comment comprendre ces franges séparées de $\lambda/2$?
- 3.5. La réalisation de nos propres hologrammes avec déformation

PARTIE 4 : Perspectives et développement

- 4.1. Améliorer notre système
- 4.2. Utiliser la "boîte d'expériences" pour réaliser partout des hologrammes
- 4.3. Comprendre ce qui se passe mathématiquement
- 4.4. Visualiser en direct le résultat de la déformation
- 4.5. Visualiser la « signature » d'une perturbation périodique

Bibliographie - Sitographie

Annexes (NB : fichier à part)

Remerciements

- À Monsieur Chartier, enseignant-chercheur, et à travers lui à l'E.N.S.S.A.T. (Lannion), qui nous a consacré deux après-midis pour nous former à l'holographie. Vraiment un grand merci car nous avons pu régulièrement faire appel à lui pour nous conseiller (courriel ou téléphone).
- À nos experts qui chacun dans leur domaine, nous ont aidé à progresser : M. Gentet, ancien élève de l'E.N.S.S.A.T. et chef d'entreprise (Ultimate Holography), pour ses connaissances pointues en holographie et M. Bruder, ingénieur-commercial et co-concepteur du logiciel Loggerpro (Vernier), pour son aide dans l'utilisation de ses fonctions avancées.
- Enfin à Mme Robert, proviseure le lycée Jacques Cartier (St Malo), qui nous a donné les moyens de développer le projet. Son soutien fut important.

Résumé

Suite à notre TPE, nous avons eu envie de réaliser nous-mêmes des hologrammes. Fortes d'une première rencontre avec M. Chartier, enseignant-chercheur à l'E.N.S.S.A.T. de Lannion, nous avons décidé de continuer l'aventure en participant aux Olympiades. Il nous a fallu, dès la première S, en apprendre plus sur les ondes lumineuses et les phénomènes caractéristiques, puis trouver un sujet d'étude. Il est venu par hasard. M. Chartier nous imposait l'immobilité et le silence le plus total. Pendant ces longs moments, chacune de notre côté, nous nous demandions : *"Et que se passerait-il si... ?"*. Il nous a répondu et nous a montré, pour illustrer, un hologramme avec des franges d'interférences. Quelques mois après, nous avons choisi d'étudier un tel hologramme afin de caractériser l'infime déformation exercée sur un objet plat (placé derrière la plaque holographique) voire même d'en estimer la valeur. Cela nous semblait à la fois accessible comme très mystérieux...



Notre dossier complet (depuis notre TPE), et bien d'autres bonus (autres annexes, vidéos...) ici :

<http://physiqueetchimie.free.fr/OdP2020/accueil.htm>

Partie 1 : Des « faux » hologrammes aux « vrais » hologrammes

1.1. Au départ il y avait notre TPE...

La présence des hologrammes s'accroît de plus en plus dans notre quotidien et dans de nombreux domaines. En effet, dès l'enfance, les hologrammes sont présents dans des dessins animés tels que les *Totally Spies*, dans le monde de la musique avec la chanteuse d'opéra Maria Callas et sa tournée en 2019, 40 ans après sa mort.

On peut remarquer que ces hologrammes sont utilisés dans un contexte fantastique et créatif. Mais, dès les années 80, dans le cinéma, avec la saga *Stars Wars*, l'hologramme est identifié comme un moyen de communication du futur. C'est le côté magique de cette technologie qui nous a, dans un premier temps, attiré. C'est ce que nous avons développé dans notre TPE ...

De plus, pour renforcer notre décision, l'E.N.S.S.A.T. de Lannion, une école publique d'ingénieurs qui associe formation, recherche et innovation technologique dans les secteurs de l'informatique, de la photonique et des systèmes numériques, proposait un TP afin de créer son propre hologramme. Autant d'indices pour asseoir notre détermination à développer ce projet jusqu'à participer aux Olympiades de Physique.

La problématique de notre TPE

Les hologrammes sont-ils accessibles à tous ? En prenant le mot "accessible" dans divers sens : accessible à tous les yeux, accessible en termes de compréhension, accessible à tous en termes de technologie. Serait-il possible d'en faire au lycée ? Même chez nous ?

La démarche en TPE

Le fil conducteur de notre travail a été la méthode de René Descartes. Ce philosophe, physicien et mathématicien français, est considéré comme le fondateur du rationalisme. Il s'appuie sur la raison et l'évidence, affirmant que chaque fait un tant soit peu incertain doit être considéré comme faux. Ainsi, d'hypothèses en expériences, nous avons résolu l'énigme des hologrammes observés à partir d'une pyramide renversée sur une tablette.

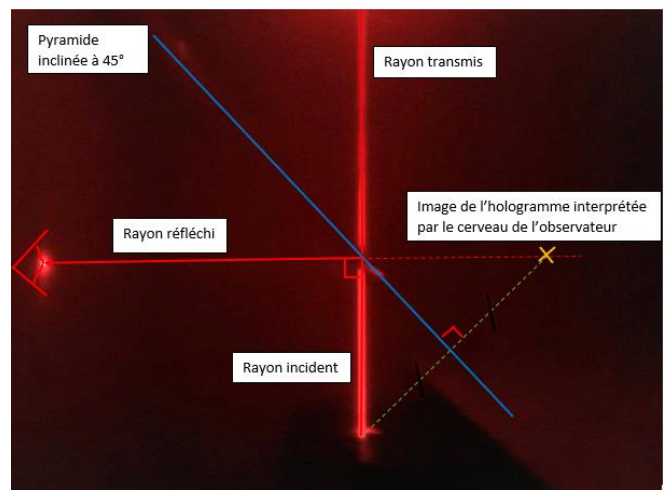
Nous sommes parties de questions simples pour peu à peu éliminer ce qui ne concernait pas notre explication. Chaque expérience, chaque observation, venait valider ou invalider nos hypothèses.

Cela a été l'occasion pour nous d'utiliser la "boîte de mesures" que nous avons imaginée pour photographier les phénomènes et pour faire des mesures. Inversement, les observations faites à l'aide de cette boîte (photos ci-contre), nous ont permis d'imaginer d'autres méthodes pour vérifier nos hypothèses. (Annexe B)

(Pour en savoir plus : Annexe I -web)



Groupe TPE, Saint-Malo, fait dans la boîte de mesures



Conclusion : cela confirme bien qu'un seul type de rayon est à l'origine de l'image formée au centre de la pyramide. C'est bien la réflexion qui est en cause.

Une technique bien connue : le Pepper Ghost !

À notre grande surprise, après quelques recherches, nous avons réalisé que cette technique qui paraissait si moderne (utilisation d'une tablette, spectacles utilisant les toutes dernières technologies...) était déjà bien maîtrisée par les illusionnistes du 19ème siècle.

Le Pepper's ghost (littéralement "Fantôme de Pepper") a été inventé en 1862 par Henry Dircks.

Ce principe permettait aux magiciens de faire apparaître et disparaître des objets et aux comédiens d'apparaître à la manière de fantômes.



1.2. Distinction entre faux et vrais hologrammes

L'hologramme réalisé avec notre dispositif n'en était donc pas un « vrai » !

Pour bien comprendre la distinction, une petite expérience avec une petite figurine. Nous avons donc une figurine : nous la regardons de face, puis par la gauche, enfin par la droite. Tout se passe comme si nous regardions son hologramme : une image en 3D !

Le magnifique hologramme représentant Pharaon, exposé à l'E.N.S.S.A.T., est en ce sens impressionnant ! (cadeau de M. Gentet, ancien élève de l'ENSSAT). Pour voir notre film, utiliser le QR-Code ci-contre...



De face : la figurine nous regarde



Par la gauche : celle-ci ne nous regarde pas



Par la droite : celle-ci ne nous regarde pas

Jade, Saint-Malo, à la maison

Ensuite nous avons pris la première image et nous l'avons observée par la gauche puis par la droite. Comme pour toute image projetée sur un écran, ou observée à travers un appareil optique comme notre pyramide renversée, nous l'observons le même profil quel que soit le point de vue : ce sont des images en 2D.



Heureuse conséquence

Loin de nous décourager, au contraire désireuses d'en savoir plus sur les « vrais » hologrammes, nous avons saisi l'occasion d'aller un après-midi à la rencontre de M. Chartier, enseignant-chercheur à l'E.N.S.S.A.T. (Lannion).

Il nous a permis d'en faire quelques-uns (présentés lors de notre soutenance de TPE) mais aussi de nous faire prendre conscience des grands principes nécessaires à la compréhension et à la réalisation des hologrammes.

PARTIE 2 : À la découverte de l'holographie

2.1. Première visite à Lannion : découverte du principe de l'holographie

Le 31 janvier 2019 nous avons donc été accueillis à l'E.N.S.S.A.T. La visite des laboratoires d'optique, à travers quelques démonstrations d'expériences, nous a permis de comprendre les phénomènes mis en jeu en holographie ainsi que d'être sensibilisées aux conditions de la réalisation d'un hologramme.

Petit commentaire : Nous avons noté tout ça dans un coin de notre cerveau, pour plus tard, quand nous aurions les compétences requises.



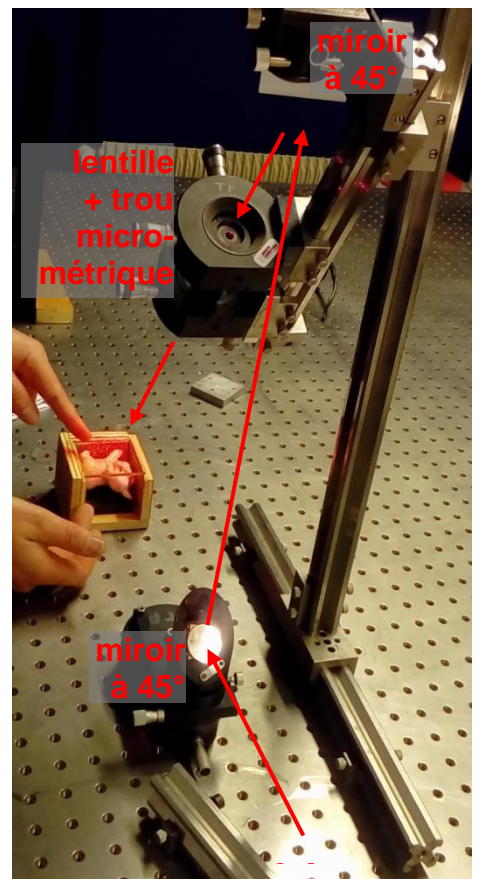
Pour couronner notre TPE, nous voulions réaliser un "vrai" hologramme et le montrer au jury.

Comment avons-nous réalisé des hologrammes ?

Pour cela, nous avons tout d'abord choisi une figurine à holographier que nous avons placée dans une petite boîte en bois. Puis, nous avons allumé un laser de longueur d'onde 632,8 nm et réglé le dispositif pour qu'il éclaire bien l'ensemble de la figurine. Une fois cette vérification effectuée, nous avons masqué le laser* afin qu'il n'éclaire pas la plaque.

Nous avons ensuite éteint la lumière pour conserver seulement un éclairage inactinique* (une diode verte pour ne pas être entièrement plongés dans la pénombre). Les plaques holographiques que nous utilisons, sont sensibles aux longueurs d'ondes rouges. (Annexe G)

Enfin, M. Chartier a sorti les plaques holographiques. Celles-ci sont des plaques en verre d'environ 6 cm de côté, et dont une des faces est recouverte d'une très fine couche de gélatine (de 5 à 10 μm d'épaisseur) contenant des cristaux d'halogénure d'argent en suspension. La première étape de la réalisation d'un hologramme est donc de repérer la face où se trouve l'émulsion* (la gélatine). Astuce : on gratte légèrement avec une punaise le coin de la plaque. La face que la punaise raye (on sent qu'elle "accroche"), est celle où est déposée l'émulsion. (Annexe C)



Remarque importante !

Le côté avec l'émulsion doit se **situer** vers l'objet pour que l'hologramme se forme. Tout au long de la **révélation**, il faudra bien repérer cette face, ne serait-ce pour ne pas l'abîmer.



Bien sûr tout se passe dans le noir ; seule la lampe inactinique* nous éclaire. Nous nous sommes reculées à l'autre bout de la pièce, avons attendu quelques instants, et Méline a déclenché le laser qu'elle a éteint au bout d'un temps d'exposition de 4 secondes.

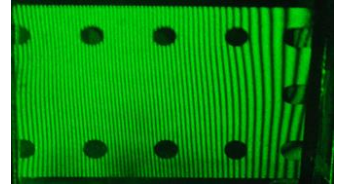
L'origine de notre problématique

À ce moment de l'expérience, le but est de faire le moins possible de vibrations dues au son ou à un mouvement pour ne pas perturber le phénomène d'interférences.

Recommandation appuyée de M. Chartier : Pour assurer une bonne qualité de l'hologramme, il faut minimiser les perturbations : pas de bruits, de chocs.

Toutes de notre côté, nous sommes demandées pendant ces moments d'attente en silence : « Mais qu'arriverait-il s'il y avait une perturbation ? par exemple un son ? »

C'est là que M. Chartier nous a présenté cet hologramme issu de travaux d'élèves. Très curieux, pas encore compréhensible pour nous...



Plus tard, notre professeur nous dira : « Vous devriez pouvoir l'étudier car les interférences seront vues en terminale S. » Par ailleurs, la présence de franges d'interférences alors même que les hologrammes sont issues d'interférences nous a bien intrigué.

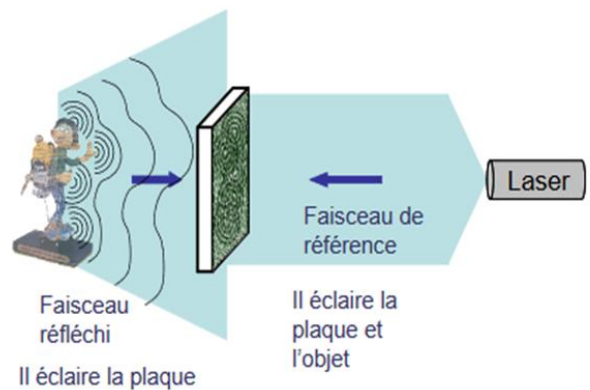
2.2. Principe des hologrammes

Comme la révélation est longue, en attendant, quelques explications...

Pendant le temps d'exposition, la lumière émise par le laser arrive sur la plaque holographique par la droite (sur le schéma). Ce faisceau est appelé faisceau de référence* puisqu'il arrive sur la plaque « tel quel », sans avoir rencontré aucun objet.

Cependant, comme la plaque holographique est transparente, il la traverse et arrive sur l'objet situé derrière. Celui-ci, dans son rôle de source de lumière secondaire, renvoie alors la lumière reçue dans toutes les directions, y compris vers la droite, sur la plaque holographique. L'émulsion présente sur la plaque reçoit par conséquent deux faisceaux : celui de référence, venu (sur le schéma) de droite, et le faisceau objet*, venu de gauche.

ENSSAT, Lannion - Extrait mode d'emploi de la valisette pédagogique
Par simplicité les faisceaux sont horizontaux, perpendiculaires à la plaque holographique



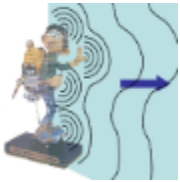
Comme l'objet a une forme et un relief, chaque rayon du faisceau objet est plus ou moins déphasé* par rapport au faisceau de référence. Ainsi, « l'ajout d'un faisceau de référence permet d'avoir une référence de phase pour le faisceau objet dont le front d'onde a été déformé par la réflexion sur l'objet. C'est ainsi qu'il est possible d'inscrire une information sur le relief de l'objet, traduite en déphasage relatif », selon M. Chartier.

Les deux faisceaux vont donc se rencontrer et interférer au niveau de la plaque. L'émulsion enregistre la figure d'interférences* créée, ce qui correspond, comme en photographie argentique, à un « négatif » de l'hologramme. L'hologramme « positif » se retrouve grâce aux bains de révélateur, de blanchiment et d'agent mouillant effectués juste après.

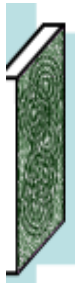
Pour résumer :

- Chaque point de la surface du personnage se comporte comme une source ponctuelle (comme pour une diffraction*).

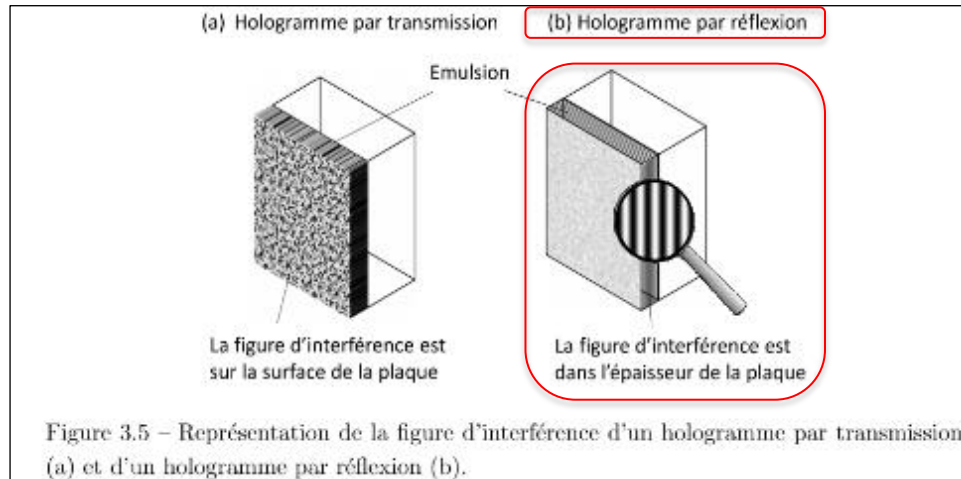




- Chacune va interférer avec les autres pour créer cette “enveloppe” que l’on appelle l’onde objet* (par opposition à l’onde de référence* directement issue du laser).
- Ce “résultat” va être enregistré dans la plaque (ci-contre une représentation).



Pour être plus précises, voici le “mode” d’enregistrement selon la méthode : les franges s’inscrivent dans l’épaisseur de la gélatine.

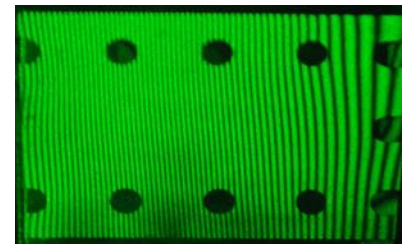


ENSSAT, Lannion - Extrait d'un cours : la méthode utilisée est celle par réflexion

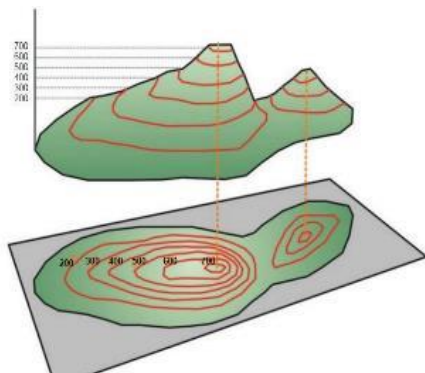
2.3. Modélisation du « fameux » hologramme avec franges d'interférences

Mauvaise nouvelle, tout ce que nous avons envisagé lors de notre étude accélérée du début de programme de terminale S, y compris les nouvelles formules que nous avons découvertes, n'allaient pas nous servir pour étudier ces hologrammes particuliers. Par contre, il semble qu'il y ait une certaine périodicité spatiale* à exploiter.

Que faire ? La réponse de M. Chartier : « *C'est comme des courbes de niveaux en cartographie ! Mais ici la distance entre deux franges noires correspond à la moitié de la longueur d'onde du laser.* »



Analogies



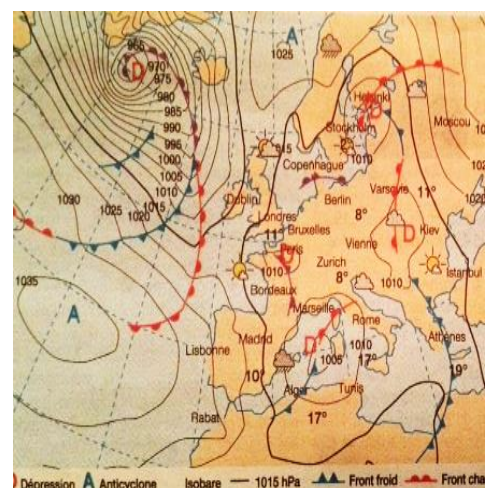
équidistance de 100 m représente un dénivelé de 100 m.

Un autre exemple : les isobares d'une carte météorologique. C'est une ligne reliant les points de même pression à un moment donné. Ci-contre on peut distinguer dépressions et anticyclones. On constate sur cette image que plus les isobares sont resserrées, plus la pression est faible, c'est à dire qu'il y a dépression.

En cartographie, une courbe de niveau est une ligne reliant les points du relief situés à la même altitude.

Sur l'image ci-contre, comme sur une carte IGN, on peut visualiser le relief d'une montagne. Plus les courbes de niveau sont serrées, plus l'altitude monte vite. Lorsque les courbes sont éloignées, il n'y a pas ou peu de dénivelé.

L'équidistance, distance entre deux courbes de niveau, est généralement indiquée dans la légende de la carte. Ici, une



Remarques importantes pour la suite

Cependant on peut constater que nous pouvons savoir le sens des variations, positives ou négatives, seulement à partir des informations données au niveau des courbes. Bref, il faut une référence ! Sans cela, nous ne pourrions pas savoir si c'est une montagne (ou un anticyclone) ou si c'est un creux (ou une dépression).

Au niveau de notre hologramme, il n'y a aucune référence... **Serons-nous capables de savoir dans quel sens est la déformation ?**

Par contre, l'analogie nous montre bien que **plus les franges d'interférences sont resserrées, plus la déformation est importante.**

Par ailleurs M. Chartier nous apporté un élément important (*à ce moment non compris*) : chaque frange brillante est séparée d'une longueur équivalente à $\lambda/2$ (pareillement pour les franges noires).

2.4. Construction d'une méthode d'analyse

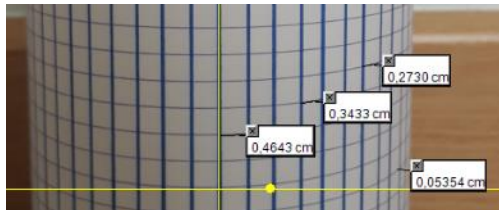
Choix d'un modèle

Si cette photo assez étrange (*pourquoi donc repasser au marqueur fin les traits verticaux d'une feuille de papier ?*) est présente ici, c'est pour un but précis : réaliser une modélisation des franges dues aux interférences à l'image des courbes de niveau.

Partons du principe que la feuille représente notre plaque holographique. Lorsqu'elle est mise à plat, les traits verticaux sont à équidistance les uns des autres. Mais une fois la feuille déformée, la distance est modifiée en apparence, et varie continûment comme les franges sur l'hologramme présenté plus haut.



Choix d'une méthode : Analyse avec Loggerpro (Annexe D pour en savoir plus)

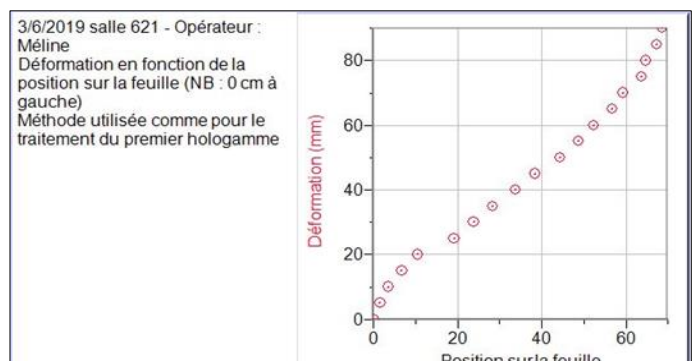


Nous avons donc choisi d'utiliser ce dispositif pour modéliser une déformation et, aidées du logiciel Loggerpro, nous avons essayé de trouver une réponse à notre question, qui était : **Peut-on retrouver la déformation** à partir de la taille des différents interfranges ?

Nous avons mis au point la méthode suivante :

- 1) Repérer par *Analyse Photo* (voir ci-contre) les distances entre les traits verticaux ;
- 2) Ensuite, dans un tableau, renseigner dans un premier temps la position de chaque interfrange sur la feuille sous le nom de la variable X ; puis dans un second temps, générer la variable Y qui n'est autre que la position à laquelle l'interfrange aurait dû se trouver si la feuille n'avait pas été déformée, c'est-à-dire 5 mm de plus à chaque fois.
- 3) À partir de là, créer un graphique, représentant la déformation en fonction de la position du trait par rapport à l'origine (*prise tout à gauche de la feuille*) : voir le graphique ci-contre.

Ensemble de données			
	x	y	Def
		(mm)	
1	0,000	0	
2	1,551	5	7,13
3	3,563	10	10,3
4	6,725	15	13,7
5	10,410	20	24,8
6	19,150	25	26,8
7	23,830	30	18,5
8	28,380	35	19,9
9	33,780	40	19,9
10	38,340	45	21,2
11	44,390	50	20,7
12	48,700	55	16,1
13	52,440	60	16,1
14	56,760	65	13,8
15	59,340	70	13,8
16	63,660	75	11,0
17	64,820	80	7,50
18	67,410	85	7,52
19	68,580	90	



Limites de notre modélisation

- Il nous est compliqué, à partir de ce graphique, de savoir si la déformation est faite vers l'avant ou bien vers l'arrière. Cependant, on retrouve

bien la présence d'un point d'inflexion*, signe d'une déformation qui semble être symétrique à gauche comme à droite.

- Notre modèle des « traits verticaux » correspond bien à des franges verticales (la déformation est alors horizontale). Mais si la déformation donne des cercles concentriques, ou d'autre formes, il faudrait changer de « quadrillage ».

- Enfin, on fait face à un manque de précision : lorsque la courbure est trop importante, il est très difficile, voire impossible, de distinguer parfaitement les traits les uns des autres.

Cette dernière restriction va notamment nous limiter dans l'étude d'un hologramme avec franges d'interférences (*voir paragraphe suivant*). C'est pour cela qu'il faudra une déformation infime pour ne pas avoir trop de franges (*maximum une soixantaine, et encore si le contraste est suffisant !*).

2.5. Application de la méthode à l'hologramme en question

a) Traitement préalable avec SalsaJ (*Annexe E pour en savoir plus*)

Coordonnées des points

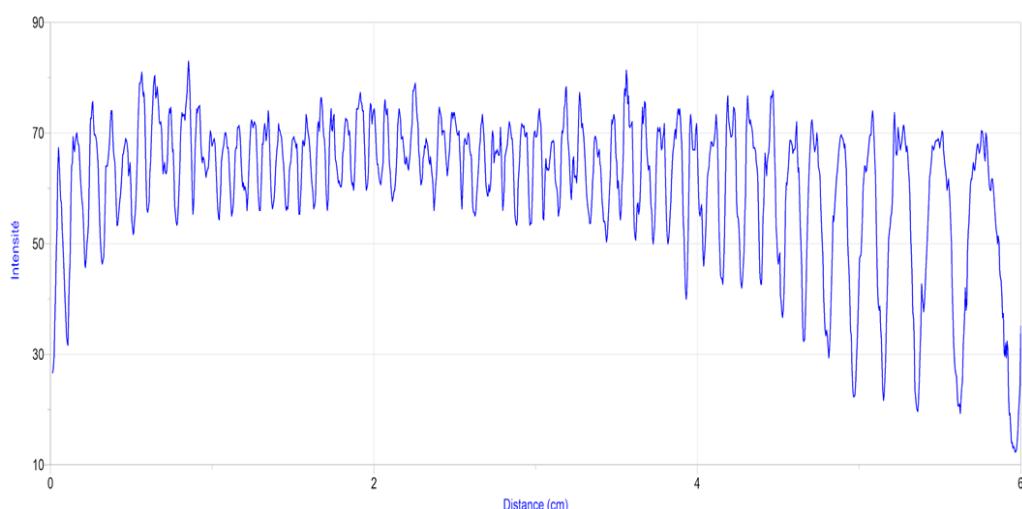
Fichier	Edition	Format
X	Y	
4.000	23.333	
4.005	27.667	
4.009	34.000	
4.014	39.667	
4.018	45.667	
4.023	50.333	
4.027	58.333	
4.032	62.333	
4.036	62.667	
4.041	59.667	
4.045	58.333	
4.050	58.000	
4.055	52.667	
4.059	50.000	
4.064	46.000	
4.068	42.000	
4.073	38.667	
4.077	36.000	

Nous ne pouvons plus utiliser uniquement Loggerpro car les franges sont trop resserrées. Il est nécessaire de passer par une application qui va détecter pour nous les variations d'intensités lumineuses.

1. Photographie de l'hologramme à franges : avec un logiciel de traitement d'images on peut améliorer le contraste et la netteté.
2. Traitement avec le logiciel SalsaJ qui mesure l'intensité lumineuse.
3. Obtention d'un fichier qui donne les valeurs de X (distance par rapport à l'origine choisie : point de serrage) et de Y (intensité lumineuses). Capture ci-contre.

b) Analyse manuelle avec Loggerpro

4. Récupération des données brutes dans Loggerpro : on obtient une courbe où les minima correspondent aux centres des franges sombres et où les maxima correspondent aux centres des franges brillantes. (*voir courbes ci-dessous*)



Mathilde, 2019, St Malo - Loggerpro

	x (cm)	Déformation (μm)
1	0,028	0,3164
2	0,376	0,6328
3	0,635	0,9492
4	0,847	1,2656
5	1,034	1,5820
6	1,186	1,8984
7	1,342	2,2148
8	1,474	2,5312
9	1,601	2,8476
10	1,725	3,1640
11	1,841	3,4804
12	1,961	3,7968
13	2,065	4,1132
14	2,180	4,4296
15	2,272	4,7460
16	2,380	5,0624
17	2,476	5,3788
18	2,560	5,6952
19	2,660	6,0116
20	2,779	6,3280
21	2,859	6,6444
22	2,947	6,9608
23	3,035	7,2772
24	3,115	7,5936
25	3,207	7,9100
26	3,294	8,2264
27	3,374	8,5428

c) Analyse automatisée avec LoggerPro

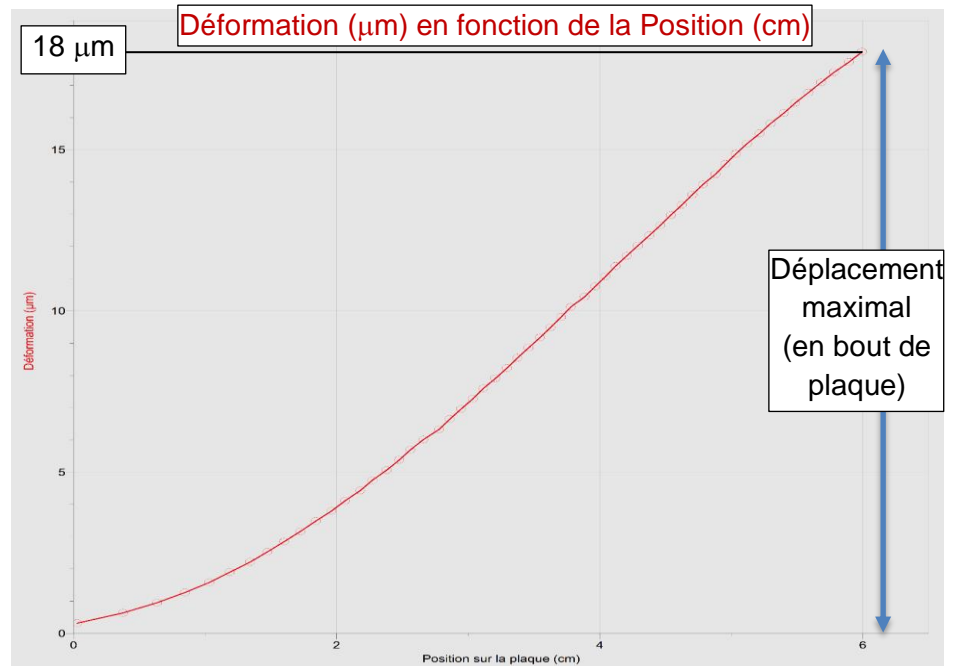
Comme il est laborieux de relever tous les minima (étape 5), nous avons eu l'idée d'exploiter les fonctionnalités du logiciel Loggerpro (tableur-grapheur du lycée) pour automatiser cette opération.

Le détail est disponible en [annexe E](#). Pour résumer, après avoir lissé la courbe, grâce à dérivation et division astucieuse, on repère les minima ; il suffit ensuite de purger les données inutiles et de réduire la colonne aux seules valeurs intéressantes, c'est-à-dire les positions des franges noires.

Limite de la méthode : si le gain de temps est indéniable, il est nécessaire que le contraste soit fort donc que la courbe, obtenue à partir des données issues de SalsaJ ne soit pas trop bruitée.

5. Relevé de la position des minima : on les stocke dans une colonne appelée X (abscisses)
6. Création automatique d'une colonne stockant les multiples de $\frac{\lambda}{2}$: la colonne Y (ordonnée).
7. Construction graphique $Y=f(X)$ qui permet de lire graphiquement la déformation.

Mathilde, 2019, St Malo –
Loggerpro

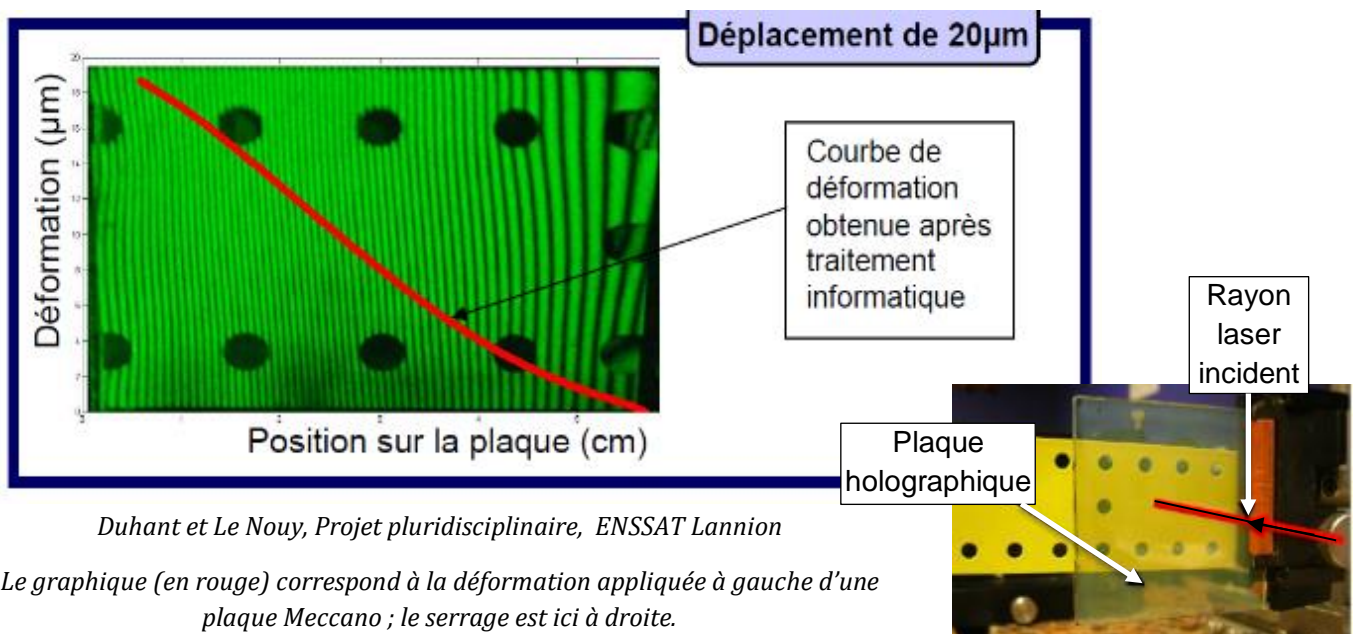


Le graphique correspond à la déformation imposée à la plaque Meccano au point d'abscisse X. Ainsi, on peut lire le déplacement maximal que l'on a obtenu à l'autre bout de la plaque, celui opposé au serrage.

d) Conclusion

La méthode, élaborée avec nos modèles en papier, donne des résultats tout à fait satisfaisants : En effet la courbe que nous avons obtenue, correspond très bien à celle qu'avait obtenue M. Chartier (ci-dessous : en rouge). *Seule différence : le choix de l'origine qui fait que les X sont inversés.*

Mieux, nous sommes parvenus à retrouver la valeur du déplacement maximal (en bout de plaque) : ici 18 μm , ce qui est du même ordre de grandeur que ce que nous avait annoncé M. Chartier (*voir ci-dessous : on lit « déplacement de 20 μm »*).



Duhant et Le Nouy, Projet pluridisciplinaire, ENSSAT Lannion

Le graphique (en rouge) correspond à la déformation appliquée à gauche d'une plaque Meccano ; le serrage est ici à droite.

Cependant, les limites de notre méthode, énoncées plus haut, sont toujours valables. Notamment la déformation doit rester autour d'une vingtaine de microns. Autrement dit, il ne faudra pas dépasser une graduation sur la vis micrométrique. Si on dépasse cette limite, il y a trop de franges d'interférences sur l'hologramme, ce qui rend impossible l'exploitation : toutes les franges se confondant entre elles. Sur l'hologramme étudié, les franges ne sont que très peu espacées : il y en a déjà une soixantaine. Imaginez donc une déformation de seulement 50 μm ce qui est déjà très petit à notre échelle !



Un autre point limitant concerne la précision de notre mesure. Au mieux, nous estimons qu'il est possible de régler la molette à 3 μm près. Cela ne permet pas d'avoir une valeur référence très fiable. Par ailleurs quelle est la précision de notre mesure ? Nous avons pu constater qu'elle est due essentiellement à la lecture de la position des minima sur Loggerpro : nous estimons cette marge d'erreur à une dizaine de pixels tout au plus ; à partir de l'échelle du graphique, on obtient une incertitude d'environ 0,05 cm. L'impact sur la lecture graphique donne une incertitude de $\pm 0,3 \mu\text{m}$.

Partie 3 : Holographie au lycée

Jusqu'à présent nous n'avions travaillé que sur une photographie, celle d'un hologramme qui n'avait pas été réalisé par notre équipe. Il est vite devenu nécessaire de pouvoir produire nos propres hologrammes afin que ceux-ci répondent précisément aux questions que nous nous posions.

Nous avons donc sollicité une nouvelle fois M. Chartier qui nous avait parlé d'une valisette contenant un kit pour réaliser des hologrammes sans avoir besoin de laboratoire d'optique et de matériel aussi complexe qu'à Lannion. Le prêt de cette valisette nécessitait une formation auprès de M. Chartier ; nous sommes par conséquent retournés à Lannion le 18 juin 2019.

3.1. Deuxième visite à Lannion : formation et élaboration d'un autre montage

Formation à un kit pédagogique et utilisation d'un premier montage

Nous connaissons l'existence d'un kit pédagogique : une bonne façon de commencer à faire des hologrammes au lycée ! Mais nous devons nous former...

Premières réalisations

Cela nous a permis de nous former et d'avoir un montage accessible. Le principe est le même que celui que nous avons testé en janvier pour notre première visite. Mais ce dispositif, s'il implique certains défauts, est adapté pour de l'holographie en secondaire. Rassurant !



Groupe, 18/6/2019, Lannion (ENSSAT)

Une nécessité : Élaboration d'un autre montage plus adapté pour atteindre notre objectif

Autre objectif : trouver un moyen de réaliser des hologrammes témoignant d'une déformation

En bref il s'agit :

- de choisir le meilleur montage pour placer l'objet à holographier et à déformer (par exemple une plaque de Meccano, assez souple)
- de lui appliquer une déformation très faible. Pour cela il faut trouver avec lui un système, une idée. Par chance l'équipement de l'école permet d'envisager diverses solutions !

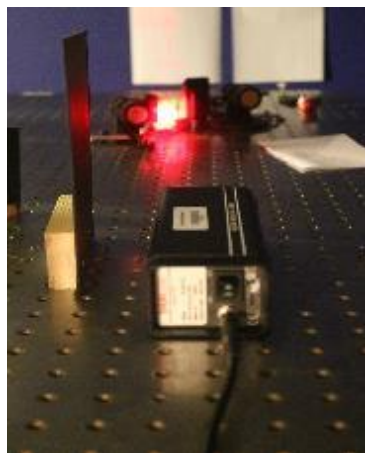
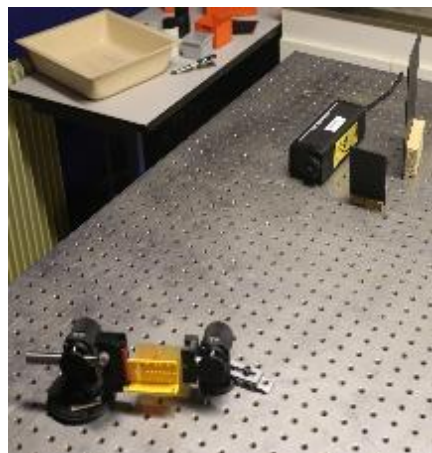
Le dispositif choisi

Après divers essais, étant donné la qualité et la diversité du matériel disponible, grâce aussi à l'expérience de M. Chartier, voici notre dispositif en quelques photos. Nous l'avons testé pour réaliser un hologramme simple puis pour en réaliser un autre avec une double exposition*.

Cela signifie que dans un premier temps, nous l'avons exposé à la lumière laser pendant la moitié du temps (soit environ 2-3 secondes). Puis, après avoir déformé légèrement la plaque mécano, nous avons de nouveau exposé notre dispositif à la lumière laser pendant le même temps. Bien noter que, tout le long de l'expérience, la plaque holographique n'a pas été bougée. C'est à l'issue de la deuxième exposition que l'on récupère la plaque holographique pour la développer.

Voici le dispositif et le résultat : ci-dessous

Attention ! Une déformation de 10 μm est bien suffisante. Un impératif comme nous l'avons vu.



Groupe, 18/6/2019, Lannion (ENSSAT) : le dispositif et notre hologramme à double exposition

3.2. De retour au lycée, mise en pratique

Grâce à la valisette, nous nous sommes lancés le défi de réaliser nous-mêmes nos hologrammes. Mais le plus grand défi était de reproduire, avec nos moyens modestes, l'expérience élaborée à Lannion.

Et si nous pouvions réaliser un hologramme avec franges d'interférences ?

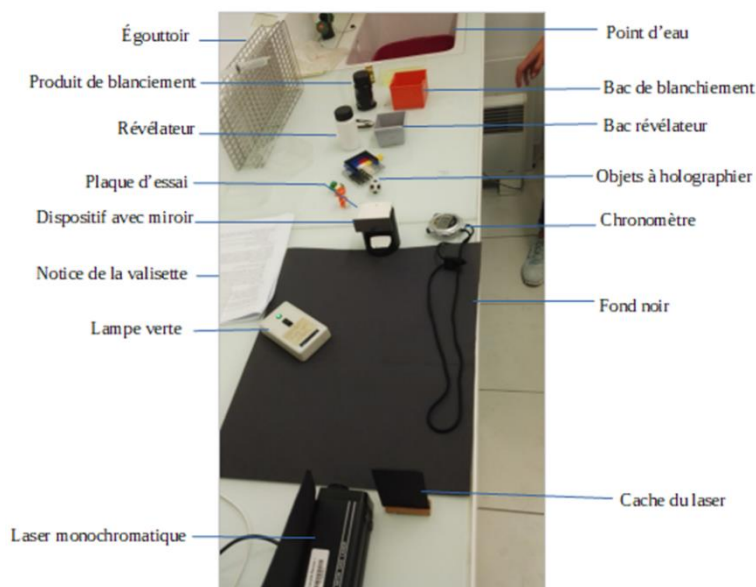
Pour cela, nous nous sommes installés dans une salle noire disponible au lycée, et nous avons dû sacrifier quelques jours de nos vacances (9 et 10 juillet) !

Notre laboratoire, nos premiers essais

Une absolue nécessité : aucune lumière ne doit venir brouiller l'hologramme. Nous avons donc déniché une salle sans fenêtre au laboratoire de SVT.

Cependant M. Guitard a dû enfile son casque de bricoleur pour faire le noir total. Il a placé tout autour de la porte et au niveau des charnières du scotch noir ; il a aussi inséré un "boudin de porte" sous la porte. Une fois le noir total acquis, nous avons eu besoin d'entraînement et de nous adapter à ce nouvel espace très différent de celui de Lannion afin de réaliser au mieux et en toute autonomie nos hologrammes.

Marine, 06/2019, St Malo : utilisation de la valisette

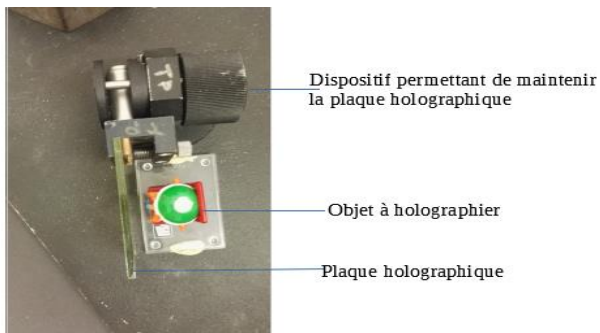


Utilisation de notre « montage maison »

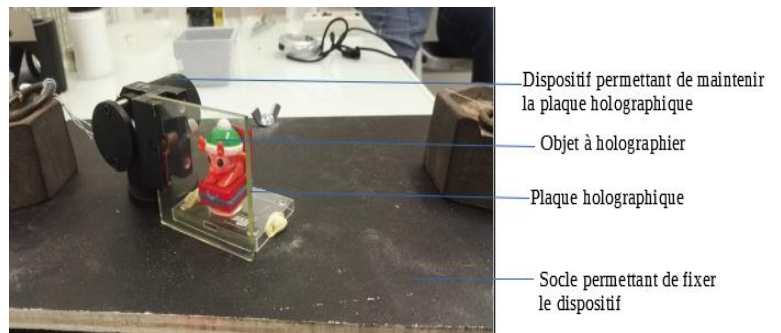
Dans notre dispositif, la plaque n'est pas posée à l'horizontale mais repositionnée à la verticale. Elle est juste maintenue par un étau de banc d'optique. L'objet est juste placé derrière, debout.

Le laser reste à 40 cm de notre support de travail, confectionné en bois et sur lequel le système holographique est fixé.

On s'est arrangé pour que la plaque holographique fasse un angle de 30° comme pour le montage observé à Lannion. Cet angle est nécessaire pour offrir un meilleur confort d'observation de l'hologramme réalisé



Vue de haut - Marine, 06/2019, St Malo



Vue de face - Marine, 06/2019, St Malo

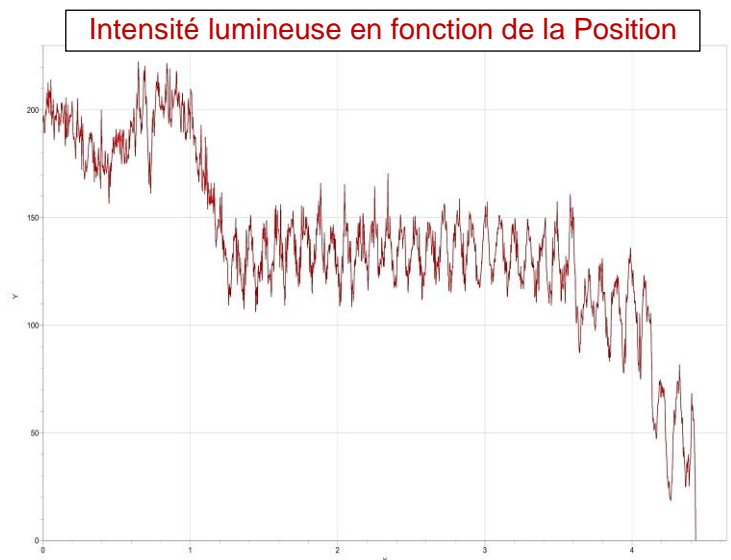
3.3. Mise en application de notre méthode sur l'hologramme réalisé à Lannion

Lorsque nous sommes retournés à Lannion le 18 juin 2019, nous avons également eu le temps de réaliser un hologramme à franges d'interférences. Naturellement, nous l'avons analysé avec la méthode que nous avons mise au point.

Tout d'abord, il a fallu photographier cet hologramme puis traiter l'image pour avoir le meilleur contraste. Pas une mince affaire !

Puis, avec le logiciel Salsa J, nous avons repéré les franges sombres et lumineuses pour obtenir un tableau de valeurs exploitables.

Mais nous avons alors rencontré un problème : comme vous pouvez le voir sur le graphique ci-contre, la courbe était bruitée et les minima très peu clairs. Cela rendait impossible l'application de la méthode automatisée mise au point précédemment. Mathilde, la déléguée à l'exploitation des hologrammes, a donc dû repérer à la main chacun des minima pour construire la courbe, ce qui a donné de bien meilleurs résultats.

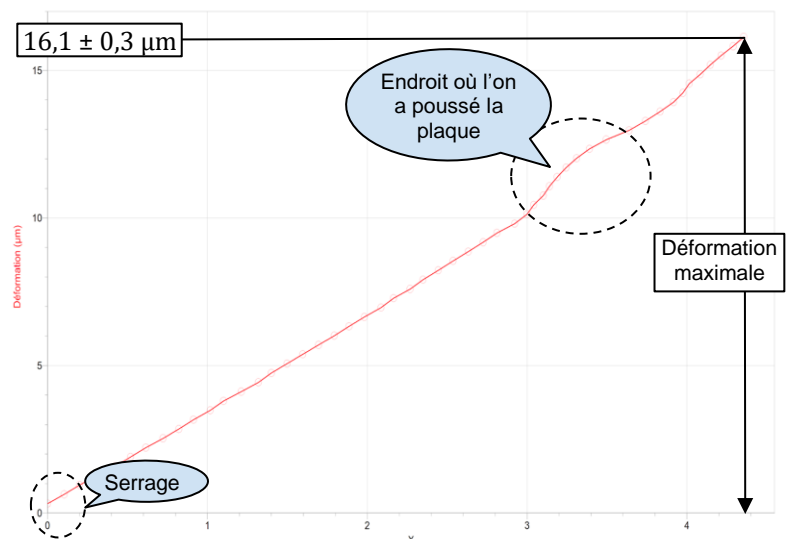


Mathilde, Saint-Malo, 2019

Au final, après construction d'un tableau avec la position des minima en abscisses et les multiples de $\lambda/2$ en ordonnées, nous avons obtenu le graphique ci-contre.

Ici, on a donc une déformation d'environ $16 \mu\text{m}$, ce qui correspond à notre ordre de grandeur.

La courbe est plus ou moins droite ce qui signifie que la plaque de Meccano s'est peu courbée sur toute sa longueur. La bosse qu'on peut observer autour de 3 ou 4 cm est, selon nos hypothèses, causée par la poussée de la tige à cet endroit ; il est logique que cet endroit ait été plus déformé que les autres.



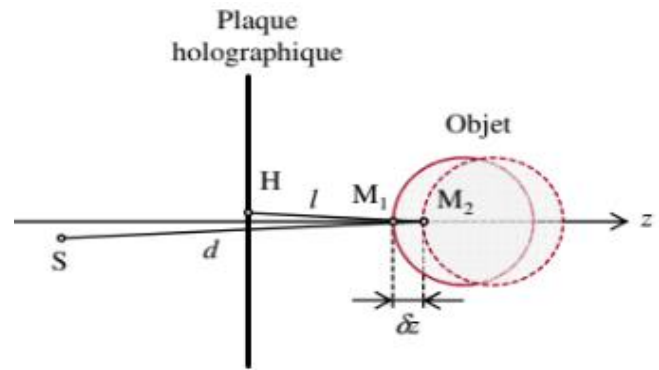
Mathilde, Saint-Malo, 2019

3.4. Un peu de réflexion : Comment comprendre ces franges séparées de $\lambda/2$?

Ci-contre une situation simplifiée.

L'étude ardue (notamment de l'article AF3345 – voir la bibliographie) nous indique que le point H reçoit la superposition de l'onde provenant de M_1 et celle provenant de M_2 . L'intensité au point H s'écrit donc : $I = I_0 \times (1 + \cos(\theta_1 - \theta_2))$.

NB : La démonstration de cette formule est dans la partie 4.3



C'est l'équation de base de l'interférométrie pour une double exposition, pour laquelle :

I_0 est l'intensité lumineuse initiale du laser

I est l'intensité lumineuse au point H de la plaque holographique

$\theta_1 - \theta_2$ correspond à la différence de phase entre la lumière du rayon de référence et du rayon diffusé

Explication : comme la distance parcourue par la lumière lorsque l'objet était à sa position initiale (M_1) est plus grande que celle actuelle (M_2), les deux ondes (référentes et diffusées) sont déphasées.

Confirmation : nous avons retrouvé la démonstration dans l'article AF3340 (ci-contre) où m serait le contraste et φ_1 le déphasage.

L'intensité du phénomène d'interférence en H est donnée par l'expression :

$$I_1 = I_0 (1 + m \cos \varphi_1)$$

Extraits de l'article paragraphe 5.1.1

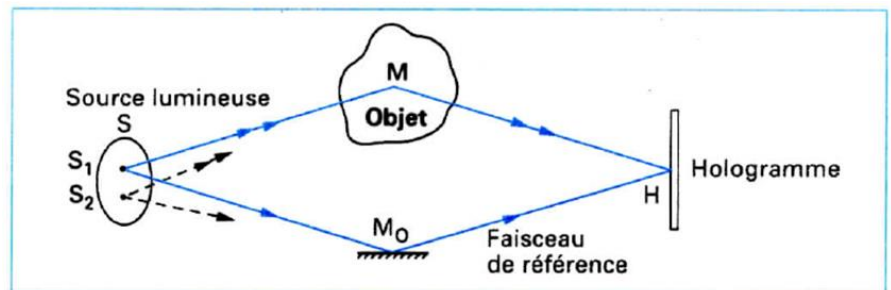


Figure 25 – Cohérence spatiale

Démonstration

Essayons d'introduire la différence de marche. Pour rappel :

d est la distance parcourue par la lumière entre la source et l'objet une fois que l'objet a été rapproché,

l est celle par la lumière entre la plaque et l'objet une fois que l'objet a été rapproché de la plaque.

En posant : $\theta_1 = k \times (d + l)$ alors : $\theta_2 = k \times (d + l + 2\delta z)$

on peut écrire : $\theta_2 - \theta_1 = 2k \delta z$ avec : δz la distance supplémentaire à parcourir deux fois (aller-retour)

On a donc en remplaçant dans l'équation de base : $I = I_0 \times (1 + \cos(2k\delta z))$

Par ailleurs on pose : $k = 2\pi/\lambda$

Ce qui donne : $I = I_0 \times (1 + \cos((4\pi\delta z)/\lambda))$ soit : $I = I_0 + I_0 \times \cos((4\pi\delta z)/\lambda)$

Interprétation : dans l'équation, si $\delta z = \lambda/2$, cela correspond à une variation de 2π du cosinus. Le cosinus valant 1, l'intensité est double : on passe d'une frange brillante à une autre. **Deux franges brillantes sont bien séparées de $\lambda/2$.**

Remarques importantes

(1) **Aucune indication concernant l'orientation de la déformation ! Rien ne dit si elle est vers l'avant ou vers l'arrière.** Voir nos réserves à la [PARTIE 2 paragraphe 2.4](#).

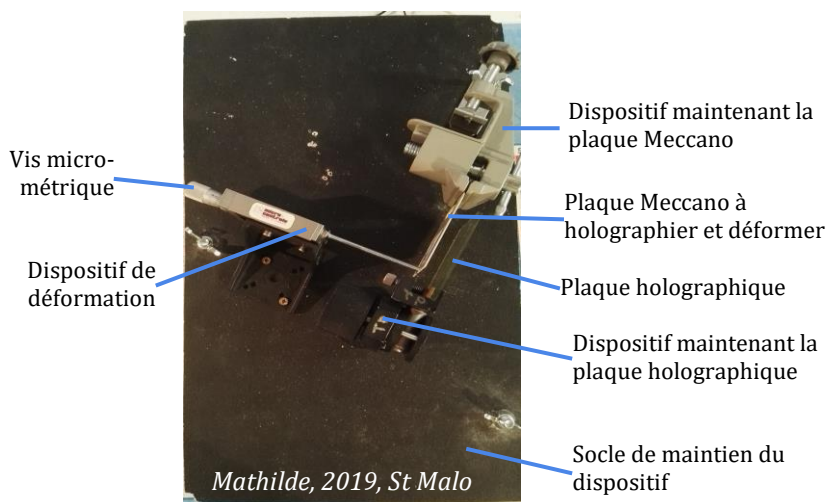
(2) Dans notre raisonnement nous n'avons parlé que de cohérence spatiale* pour laquelle la **source est ponctuelle**. Nous aurions pu aussi parler de cohérence temporelle* (donc de longueur de cohérence) ce qui impliquerait une **source monochromatique**. Voir nos développements mathématiques à la [PARTIE 4](#).

3.5. Réalisation de nos propres hologrammes avec franges d'interférences

Rappel des conditions : utilisation d'une vis micrométrique pour déformation relativement faible. Il ne faut pas avoir plus d'une soixantaine de franges (sur 6 cm environ) pour qu'elles soient distinguables.

Le dispositif

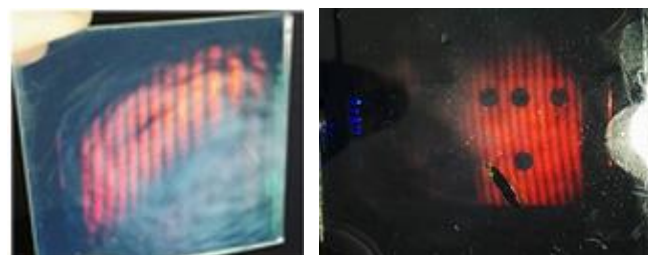
Ayant compris le phénomène et pouvant le mesurer, nous avons ensuite voulu créer nous-mêmes des hologrammes à franges d'interférences. Nous avons donc repris le système sans miroir évoqué dans le paragraphe 3.2.c) et avons mis en place le dispositif permettant de déformer de quelques micromètres seulement une plaque Meccano.



Observation de nos résultats

Nous avons ainsi réussi à obtenir quelques hologrammes à franges de déformation. Cela montrait que notre système était valide.

Groupe, 23/9/2019, St Malo : ces deux hologrammes présentes les deux défauts majeurs rencontrés



Nous avons donc pu analyser les hologrammes faits par nos soins, dans notre lycée et avec notre dispositif ! Enfin ! Mais nous sommes un peu déçus : il y a un problème. L'hologramme n'est pas entier... Il faut même pivoter la plaque pour voir la suite de l'hologramme tout en perdant la partie visible auparavant. Pour mieux nous faire comprendre, nous avons essayé de filmer : voir le QR-code...



Conclusion

Ceci nous amène à nous pencher sur les défauts de notre système et à envisager des solutions pour y remédier. Il y en a quelques-uns, et pas des moindres, que nous détaillerons dans la partie suivante : les perspectives de notre projet.

Partie 4 : Perspectives et développement

4.1. Améliorer notre système

Notre système n'a pas que des qualités. Nous avons dû faire face à de nombreux problèmes tout au long de ces olympiades.

Concernant la **surexposition**, souvent responsable du voile laiteux observable ci-dessus, nous avons tenté de raisonner par rapport à la distance de la plaque avec le laser. En effet, la plaque est inclinée par rapport à celui-ci (voir photo de notre dispositif), ce qui signifie que chaque endroit de la plaque n'est pas situé à la même distance du Laser. Ainsi, peut-être l'endroit recouvert par le voile était-il celui le plus près du laser, et par conséquent était surexposé tandis que l'autre côté non ? Nous avons orienté le faisceau de manière plus pertinente : le plus intense vers les positions éloignées !

Concernant l'autre défaut, le fait que l'**hologramme soit incomplet**, M. Chartier et M. Gentet nous ont donné la solution chacun à leur manière : nous avons dû trop serrer la plaque holographique pour la maintenir, ce qui la déformait et la faisait "interférer avec elle-même" (en quelque sorte on enregistrerait les déformations de la plaque). À partir de là, trois pistes étaient possibles :

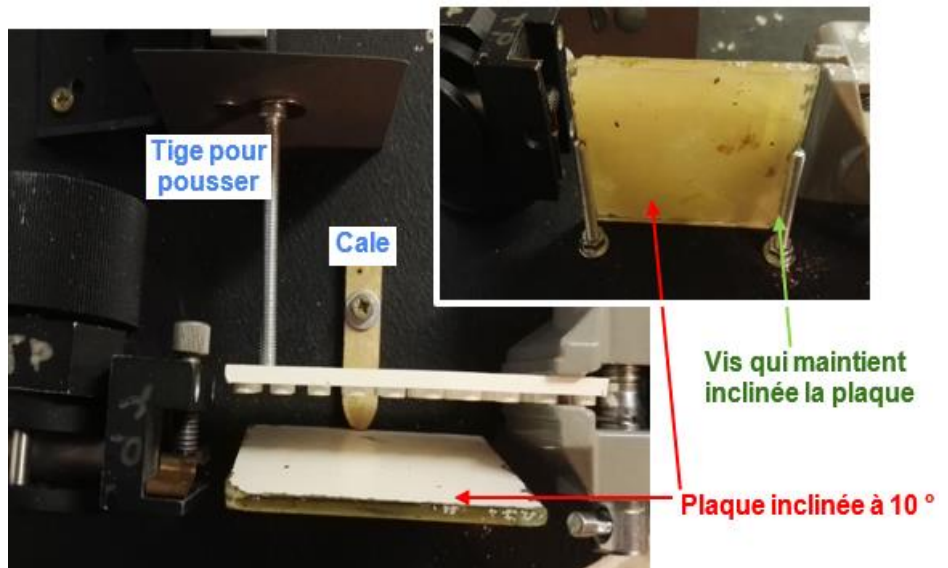
- la plus simple : serrer à peine, juste pour immobiliser la plaque (M Chartier) ;
- utiliser la gravité pour immobiliser la plaque en la penchant de 10 degrés environ et en la bloquant contre une cale (M Gentet – voir ci-dessous le montage alternatif développé) ;
- revenir au système de la valisette car, dans ce cas, pas de contrainte (car pas de serrage) : la gravité fait tout !

Heureusement, la première idée a suffi : nous avons pu obtenir des hologrammes satisfaisants. Validation de notre montage ! Mais cette idée a aussi un inconvénient : en serrant moins, on a moins de précision quant à la position exacte de la plaque. Cela nous a porté préjudice lorsque nous avons voulu observer une déformation en direct (voir paragraphe 4.4.).



Groupe, 21/10/2019, St Malo : cet hologramme reste encore trop peu contrasté (et la photo est moyenne)

Ceci dit, nous avons essayé par précaution, mais aussi par curiosité, l'idée de M Gentet. Un peu de bricolage a été nécessaire... merci M. Guitard ! Nous n'avons pu faire qu'un seul hologramme, celui d'une figurine. **Le système a été validé mais nous n'avons pas eu la nécessité de l'utiliser.** Cependant cela nous a permis de mieux comprendre.



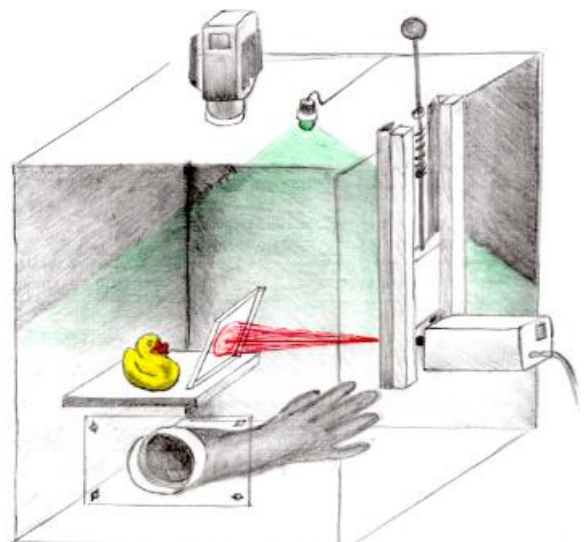
Groupe, 2019, St Malo

4.2. Utiliser la "boîte d'expériences" pour réaliser partout des hologrammes

Au cours de ces OdP, nous avons pu constater que la réalisation d'un hologramme n'est pas chose simple, ne serait-ce par la nécessité d'obscurité. En fonction du lieu, il faut s'adapter, s'organiser pour boucher le moindre interstice par lequel pourrait passer la lumière. Peu pratique.

Une question nous est alors venue à l'esprit : et si nous profitions de notre « boîte de mesures et d'expériences » de TPE pour réaliser les hologrammes en toutes conditions ?

Ce projet est en droite ligne de notre TPE. Qui plus est, ce serait un complément à la valisette dont l'objectif était de développer la pratique de l'holographie.



Papa de Mathilde, 2019, St Malo : Vue artistique

Ci-contre le système mis en place sur notre boîte, testé en décembre que nous présenterons.

4.3. Comprendre ce qui se passe mathématiquement

Il reste une question sur laquelle nous ne nous sommes pas du tout penchées durant ce projet, et qui pourtant n'est pas des moindres : comment fonctionne un hologramme ? Comment, mathématiquement, une plaque en verre recouverte d'une émulsion peut-elle enregistrer puis restituer une image en 3D ? Nous essayerons ici de répondre à cette interrogation, en précisant toutefois seulement les étapes les plus importantes du raisonnement, et en vous épargnant les développements mathématiques compliqués (à l'aide des nombres imaginaires) qu'il y a derrière.

a) Aspect physique

Commençons par dire que le principe d'un hologramme, comparé à une photographie, est non seulement d'enregistrer l'amplitude (intensité) des ondes **mais aussi leur phase**. Denis Gabor, inventeur de l'holographie, a tout simplement proposé l'enregistrement, sur un support photosensible, des interférences entre une onde de référence et une onde provenant de l'objet, ces deux ondes provenant d'une même source d'éclairage. Ainsi, on pourrait observer le décalage de phase, donc de trajet optique, entre ces deux ondes et en déduire le relief de l'objet.

La phase φ est définie par : $\varphi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda}$

où λ est la longueur d'onde de la lumière et Δ le chemin optique parcouru par celle-ci. Les interférences permettent donc d'enregistrer la phase φ (sous la forme de variations d'intensité lumineuse), donc Δ , et par conséquent le relief de l'objet. L'émulsion de cristaux d'halogénures d'argent présente sur la plaque enregistre ces interférences.

Pour restituer l'image de l'objet après développement, on éclaire la plaque avec l'onde de référence. L'hologramme va alors diffracter une onde exactement semblable à celle de l'onde objet, et dans la même direction. Ainsi, tout se passe pour notre œil comme si l'objet était encore là.

b) Aspect théorique

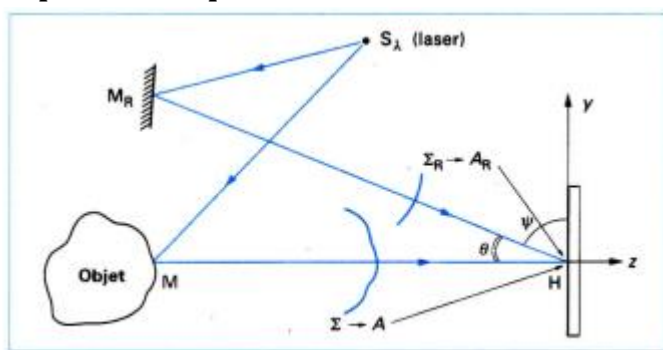


Figure 4 - Montage d'enregistrement. Notations

Paul Smigielski, AF3340 : Holographie optique - principes, 1998

La plaque holographique enregistre au point H une amplitude totale valant :

$$A_H = A + A_R$$

Où A est l'amplitude de l'onde diffusée par l'objet et A_R l'amplitude de l'onde de référence au point H (sur la plaque).

En utilisant les nombres complexes, on voit que :

$$I = A_H \times A_H^* |A_H|^2$$

I étant l'intensité au point H, et A_H^* l'amplitude complexe conjuguée de A_H . Si on remplace A_H par sa valeur, on obtient :

$$I = |A + A_R|^2$$

Pour $A = a * \exp^{j\varphi}$, $A_R = a_R * \exp^{j\varphi_R}$, avec $j^2 = -1$, $\varphi = \frac{2\pi(SMH)}{\lambda}$, et $\varphi_R = \frac{2\pi(SMRH)}{\lambda}$ (voir figure 4), après développement, on a :

$$I = a^2 + a_R^2 + 2 a a_R * \cos(\varphi - \varphi_R)$$

a et a_R représentent l'amplitude de leurs ondes respectives

φ et φ_R correspondent aux phases de leurs ondes respectives.

Soit l'intensité moyenne $I_0 = a^2 + a_R^2$ et le contraste des franges $\gamma = \frac{2aa_R}{a^2 + a_R^2}$.

On a l'expression communément admise :

$$I = I_0 + I_0 \gamma * \cos(\varphi - \varphi_R)$$

$$I = I_0 (1 + \gamma * \cos(\varphi - \varphi_R))$$

C'est pourquoi, lors de l'enregistrement de l'hologramme et en tout point de la plaque, celle-ci enregistre et l'amplitude (intensité) et la phase (φ) des ondes qui interfèrent.

Voilà la démonstration de la formule introduite PARTIE 3 paragraphe 3.4 !

4.4. Visualiser en direct le résultat de la déformation

Le 4 novembre, nous avons tenté d'observer la déformation de la plaque en direct. Pour cela, on fait l'hologramme de la plaque Meccano, qu'on développe comme un hologramme normal. Puis on repose la plaque holographique **exactement à la même place** que pendant l'exposition au Laser. On déforme alors la plaque Meccano tout en observant la plaque holographique. Normalement, l'image de la vraie plaque Meccano interfère avec l'hologramme de la plaque Meccano. Ainsi, lorsqu'on déforme d'une dizaine de micromètres, les franges doivent apparaître, exactement comme dans les hologrammes à double exposition.

Malheureusement, notre unique tentative n'a pas été concluante. Il est en effet difficile de replacer la plaque holographique après son développement à son exacte position.

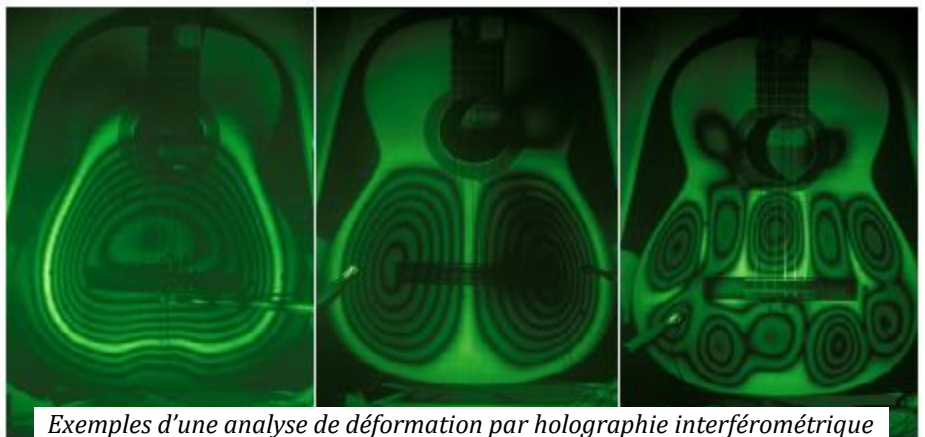
Encore en projet : À ce jour, notre système n'est pas assez évolué pour cela. L'autre idée est d'organiser un déplacement à Lannion pour avoir de meilleures conditions.

4.5. Visualiser la « signature » d'une perturbation périodique

Nous avons aussi eu l'exemple d'une application industrielle d'une déformation. Il apparaît qu'on peut visualiser une déformation spécifique à une perturbation périodique, par exemple une note de musique. La fréquence de cette note doit déformer différemment la caisse de résonance de la guitare (cas ci-contre).

Petit problème : il faut que les ondes soient stationnaires et que le dispositif holographique soit stabilisé. En effet, si la caisse de résonance se déplace pendant le temps d'exposition, l'hologramme se brouillera.

Notre idée est de visualiser ce phénomène en faisant l'hologramme d'une caisse de résonance d'un diapason, placée juste derrière la plaque holographique. Peut-être même d'observer la déformation en direct (voir le paragraphe précédent) à condition d'avoir le montage adéquat.



Exemples d'une analyse de déformation par holographie interférométrique

Bref, autant de perspectives pour continuer encore notre projet.

Merci de nous avoir lu.

Bibliographie

- [1] A. Dréau – P. Grasland-Mongrain – Sandrine Ngo, « *Projet expérimental sur l'holographie* » (Phytem)
- [2] T. Chartier, « *Chapitre 3* » (ENSSAT – PHOT1), 2018-2019
- [3] T. Chartier, « *TP n°8 Optique S3* » (ENSSAT – PHOT2), 2018-2019
- [4] Paul Smigielski, « *Holographie Optique – Principes* » (AF3340 V1), 10 octobre 1998
- [5] A. Escarguel, « *Holographie : un outil simple pour l'enseignement du secondaire au supérieur* »
- [6] C. Carré – Y. Renotte – P. Simgielski – X. Allonas – C. ley – S.Jradi, « *L'holographie, une reconstruction par la lumière grâce à un matériau photostructurable* » (HAL), 29 août 2017
- [7] CNRS, « *Journal du CNRS tiré à part du n°243 avril 2010* »
- [8] Paul Smigielski, « *Holographie Optique – Principes* » (AF3345)
- [9] E. Guyon, « *Matière et matériaux* » (Edition Belin – Pour La Science)
- [10] Y. Gentet, « *Caractéristiques générales de nos produits* » (Catalogue de Ultimate Holography)
- [11] A. Escarguel - T. Chartier, « *Manuel d'utilisation du kit holographie autonome sans laboratoire* »

Sitographie

L'hologramme définition et explication

<https://www.techno-science.net/definition/2941.html>

http://monsieur.bareilles.free.fr/articles-apprenti-chercheur/article-hologrammes/les_hologrammes.htm

<http://mpdoc.iutlan.univ-rennes1.fr/NTPF2/SERIE3/holopres.htm>

Une onde cohérente qu'est-ce que c'est ?

http://monsieur.bareilles.free.fr/articles-apprenti-chercheur/article-hologrammes/onde_cohérente.htm

L'enregistrement holographique

<http://mpdoc.iutlan.univ-rennes1.fr/NTPF2/SERIE3/holorath.htm>

L'interférométrie à double exposition

<http://photomeca.free.fr/ihde/ihde.htm>

Le L.A.S.E.R.

<http://monsieur.bareilles.free.fr/articles-apprenti-chercheur/article-laser/laser.htm>

Un fournisseur de plaques holographiques

<https://shop.ultimate-holography.com/>

L'hologramme et les interférences lumineuses

<https://docs.school/matieres-scientifiques-et-technologiques/physique/dissertation/hologramme-interferences-lumineuses-22215.html>

Art de la scène et trois dimensions

<http://www.imageshabitables.com/2013/10/14/les-hologrammes-plus-qu'une-fiction/>

Photographie argentique

<http://www.savoirs.essonne.fr/dossiers/la-matiere/chimie/lultime-sensibilite-de-la-photographie-argentique/complement/resources/>

Comment réaliser une pyramide à hologramme ?

https://hitek.fr/actualite/tuto-fabriquer-hologramme-maison_5657

https://www.lemonde.fr/pixels/article/2015/03/27/on-a-teste-pour-vous-l-hologramme-fait-maison-en-dix-minutes-chrono_4602295_4408996.html

Annexes (NB : fichier à part)