

Olympiades de la Physique 2001.

Holographie

Les élèves :
Cabrera Kalou,
Dodane Jean-Baptiste,
Dumont Christophe,
Roussillon Cyril,
Zammouri Latifa,
et leur professeur
Jean-Michel Jussiaux.

Note : Ce mémoire, ainsi que les logiciels (avec leur code source) qui y sont évoqués sont disponibles en télé chargement sur les sites Internet :

<http://perso.wanadoo.fr/jussiaux.software/>

1 Début des recherches

Les élèves ont choisi eux-mêmes le sujet, malgré les mises en garde de leur professeur : Il n'est pas possible de réaliser un hologramme classique (exposition, développement, séchage, restitution) dans les conditions de présentation devant un Jury car la durée de l'exposé est de 20 minutes, la présence de public nécessite un minimum d'éclairage et le montage est soumis aux vibrations de la salle.

La première partie du travail a consisté à rechercher des documents sur l'holographie (Internet, encyclopédie Universalis, laboratoire d'optique de la faculté des sciences de Besançon, laboratoire IGE à Belfort, entreprise Imasonic à Besançon).

Il en ressort que l'holographie n'est plus objet de recherche fondamentale, mais que de nombreux groupes essaient (ou ont déjà réussi) de la mettre au service de l'imagerie (médecine, recherche de défauts dans des matériaux, étude des déformations de solides). Plusieurs sites Internet expliquent comment réaliser un hologramme. Un site propose même de prêter le matériel nécessaire, hélas, il s'agit d'un site officiel au Canada ! Voilà une bonne idée pour développer le goût des sciences chez les jeunes (canadiens).

2 Premières visites et contacts

Nous avons ensuite visité une entreprise, Imasonic, qui fabrique des émetteurs récepteurs ultra sonores pour l'imagerie médicale (mesure de la vitesse du sang par effet Doppler et échographie), fonctionnant par impulsions à 1,5 MHz. Un responsable, Monsieur Olivier Le Baron, nous a expliqué le fonctionnement des transducteurs, les problèmes d'adaptation d'impédances, entre l'émetteur et le milieu (corps humain), pour que le maximum d'énergie soit transmise au milieu, et entre le générateur électrique, d'impédance de sortie 50 ohms et l'émetteur d'ultra sons. Plus beaucoup d'autres informations, sur l'impédance acoustique, le transfert idéal, les émetteurs

composites, l'atténuation des ultra sons, la bande passante des émetteurs et des récepteurs, les matériaux amortisseurs à l'arrière du PZT, pour amortir les vibrations et raccourcir la durée des impulsions (pulse), la lame $\frac{1}{4}$ en face avant, d'impédance intermédiaire, qui favorise le transfert d'énergie vers l'avant (comparable au traitement antireflet monocouche des lentilles en optique), la distance de champ proche, le diamètre actif des émetteurs qui ne sont pas tous plans, la technique de fabrication, dépôt des électrodes, découpe, les caractéristiques des pulses à appliquer (200 V, polarité négative sinon le PZT peut être dépolarisé, récurrence 10 kHz, puissance électrique 2 W).

Il nous a été remis 4 exemplaires d'émetteurs rejetés au contrôle qualité. Mais nous ne sommes pas parvenus à les faire fonctionner correctement. Ces émetteurs sont prévus pour la transmission des ultra sons dans l'eau ; or nous souhaitons travailler dans l'air, présenter nos expériences en public, devant un jury. Nous n'avons donc pas insisté.

Les responsables d'Imasonic nous ont aussi donné l'adresse d'une petite entreprise qui cherche à caractériser les défauts à l'intérieur d'objets métalliques massifs, par holographie ultrasonore, PRL, Corelec SA, 19, route nationale

77580 Crécy la Chapelle, tél. 01 64 63 44 11, fax 01 64 63 69 75, contact : Jean-Michel Hasquenoph. Nous ne les avons pas encore contacté.

Nous avons aussi visité le laboratoire d'optique de la faculté des sciences de Besançon. Au musée de l'holographie (responsable Claudine Bainier, tél. 03 81 66 64 21), nous avons obtenu des renseignements sur la réalisation pratique d'un hologramme (exposés un peu plus loin dans cette page), bien que le laboratoire d'optique n'en fabrique plus.

Nous en avons profité pour examiner le fonctionnement de microscopes optiques en champ proche. Ce qui nous a le plus surpris, c'est de voir la lumière verte d'un laser changer progressivement de couleur en progressant le long d'une fibre optique : L'effet Raman, utilisé pour diminuer la cohérence de l'onde laser destinée à éclairer les objets observés par le microscope. Les tables anti vibratoires sur coussin d'air nous ont aussi étonné.

Nous avons obtenu d'autres informations :

Sur les plaques à holographie, Kodak a cessé d'en produire, Agfa n'en livre que par grandes quantités, ABSYS SA (voir plus loin) en fournit au détail. Une notice technique, en anglais, sur les compositions chimiques des révélateur et fixateur, nous a été photocopiée (voir traduction en français plus loin). La firme Leybold, 13 avenue Pierre Curie F-91940 Gometz le Châtel, fax : 01 64 86 16 36, fournit du film pour l'holographie (Résolution 3000 lignes / mm) et les produits chimiques spécialement adaptés.

Sur l'emploi de l'holographie : Un laboratoire de l'Université de Franche Comté pratique la mesure de vibrations par holographie, contacter Emmanuel Foltête, laboratoire de mécanique appliquée Chaléat, chemin de l'épitahe 25 030 Besançon, tél. secrétariat 03 81 66 60 03, salle de manipulations 03 81 66 67 27. Ils ont bénéficié d'un transfert de technologies du laboratoire d'optique. Un professeur des Beaux Arts (en retraite) a réalisé des hologrammes avec l'aide du laboratoire d'optique, Jean Gilles, rue Jean Wyrsh, 25000 Besançon. Le CREST réalise l'étude d'écoulements fluides dans les turbines, à l'aide de l'holographie, directeur Jean-Pierre Prenel (l'ancien binôme en licence et DEA d'optique de notre professeur de physique), IGE Parc technologique (CREST), 2, avenue Jean Moulin 90000 Belfort. Mail : prenel@ige.univ-fcomte.fr

Nous avons contacté celui-ci, et voici sa réponse :

Bonjour

Comme le temps passe!!

Holographie : ce n'est plus qu'un (bon) souvenir sur le plan de la recherche . Notre labo a quitté le domaine dans les années 80.

Aujourd'hui , nous appliquons l'optique pour l'analyse quantitative des écoulements , des phénomènes thermiques ou des microsystèmes. Nous développons également des microcapteurs pour le tracé des profils énergétiques des faisceaux laser.

Le labo ne dispose donc plus d'aucun matériel adapté à ton problème.

Le seul "reliquat holographique" figure dans l'enseignement (DESS et surtout DEA). Désolé!

Ceci dit , vous serez les bienvenus si vous souhaitez visiter le labo!

cordialement JP PRENEL

3 Réalisation d'un hologramme optique 'traditionnel'

3 1 Fournisseurs

Nous avons commandé des plaques à holographie chez

ABSYS S.A.

7, Rue Soddy

94044 Créteil Cedex

Tél. : 01 49 56 91 00, Fax : 01 49 56 91 62

Boîte de 20 plaques sensibles au rouge (633 nm) 2,5 x 2,5 pouces, réf. 11 64 00 au prix de 433 F H.T. plus port.

Ces plaques en verre sont livrées, protégées et séparées par des intercalaires en carton, emballées dans un sac non scellé, en matière plastique noire, protégé par 3 demi boîtes en carton, emboîtées tête-bêche les unes dans les autres. L'indication figurant sur la boîte est : HRT Holographic Recording Technologies GmbH BB-640 Red sensitive holographic plates Made in Germany.

Boîte de 25 plaques sensibles au rouge (633 nm) 4 x 5 pouces, 2200 F H.T..

3 2 Réactifs chimiques (voir plus loin nos conseils d'utilisation)

En suivant les indications de la notice en anglais, The BB-Plates : Notes for use, version : 02/97, nous avons ensuite commandé chez Prolabo, les réactifs chimiques nécessaires au développement et réalisé les bains de développement, de fixation. Voici la traduction en français de la recette retenue :

Procédé de réhalogénéation

Révéléateur

// **Variante** : Il est possible d'employer un révélateur du commerce, à fort contraste, type D19 ; la durée de développement à 20 °C est comprise entre 3 et 6 minutes. Mais le D19 n'est livré que par boîtes de 1 kilogramme. Voici la formule préconisée :

700 cm³ d'eau, de préférence déionisée

70 g de carbonate de sodium anhydre

15 g d'hydroxyde de sodium *

4 g de métol

25 g d'acide ascorbique

Complétez avec de l'eau pour obtenir 1000 cm³

* Veuillez noter que certaines substances figurant dans la formule sont toxiques et / ou corrosives. Veuillez manipuler ces substances en respectant les règles de sécurité en vigueur dans votre pays.

// **Note** : Nous avons dû rechercher les autres noms du métol. Après quelques essais de lecture de plusieurs catalogues de fournisseurs de réactifs chimiques, longs et inefficaces, nous avons demandé le mot 'metol' au moteur de recherche Internet Metacrawler et la première réponse de Metacrawler a été la bonne ; elle comportait dans la description retenue pour un site, les synonymes, méthol et N-Méthyl-p-aminophénol sulfate, ou 4-(Méthylamino) phenol sulfate, ou encore Méthylamino-4 phénol sulfate (Rhodol). Il n'a même pas été nécessaire de consulter le site proposé !

Veuillez attendre que chaque réactif soit dissout, avant d'ajouter le suivant sur la liste. Il est important de limiter le temps de contact de la surface du révélateur avec l'air (oxygène). Par conséquent, il est vivement recommandé d'employer deux cuvettes de développement en matière plastique, bien ajustées l'une à l'autre, la deuxième flottant sur la surface du révélateur. Le seul moment où la surface de celui-ci est exposée à l'air étant lorsqu'on surveille l'avancement du développement. Développez jusqu'à une densité d'au moins 2,5.

Bain d'arrêt

1000 cm³ d'eau, de préférence déionisée

5 g d'hydrogénosulfate de sodium * cristallisé (sodium hydrogénosulfate, 1 molécule d'eau, Na H S O₄, H₂ O)

Rincez brièvement dans de l'eau froide et fixez

Fixateur

700 cm³ d'eau, de préférence déionisée

35 g de sulfate de cuivre (pentahydraté) *

100 g de bromure de potassium

5 g d'hydrogénosulfate de sodium * cristallisé

Complétez avec de l'eau jusqu'à 1000 cm³

Fixez jusqu'à ce que l'hologramme soit transparent. Rincez dans de l'eau froide. Normalement, sauf si vous avez réalisé des matrices (reflection master holograms, en anglais) d'hologrammes en réflexion, le fixage doit toujours être suivi du passage dans un bain 'anti tirage' (//Note : il doit s'agir

d'un traitement empêchant la reproduction de l'hologramme par tirage par contact) dont la composition est la suivante :

Anti tirage

// **Note** : Ce quatrième bain n'est pas nécessaire pour ce que nous avons décidé de faire.

700 cm³ d'eau, de préférence déionisée

3 g de dichromate de potassium *

6 g d'hydrogénosulfate de sodium *

Complétez avec de l'eau jusqu'à 1000 cm³

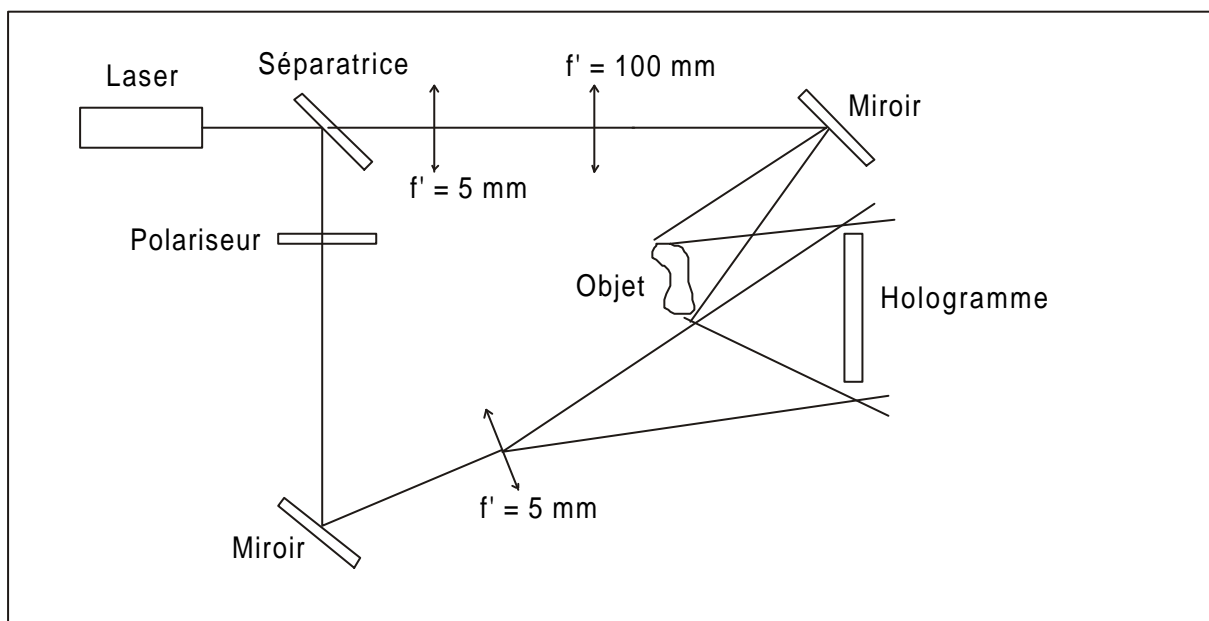
Traitez environ 1 minute en agitant. Pour rincer, plongez très vite dans de l'eau déionisée ne contenant aucune trace de révélateur. La brièveté du rinçage est nécessaire pour qu'il reste un peu de solution anti tirage dans le corps de l'hologramme. Notez que le dichromate de potassium est une substance toxique et que les hologrammes traités, mais non protégés, ne doivent pas être manipulés par de jeunes enfants.

Cet 'anti tirage' offre l'avantage supplémentaire de diminuer une éventuelle coloration présente dans l'émulsion du fait de la sensibilisation.

Nous remarquons encore une fois cette tentation du secret, de la non reproductibilité du travail.

3 3 Montage d'enregistrement

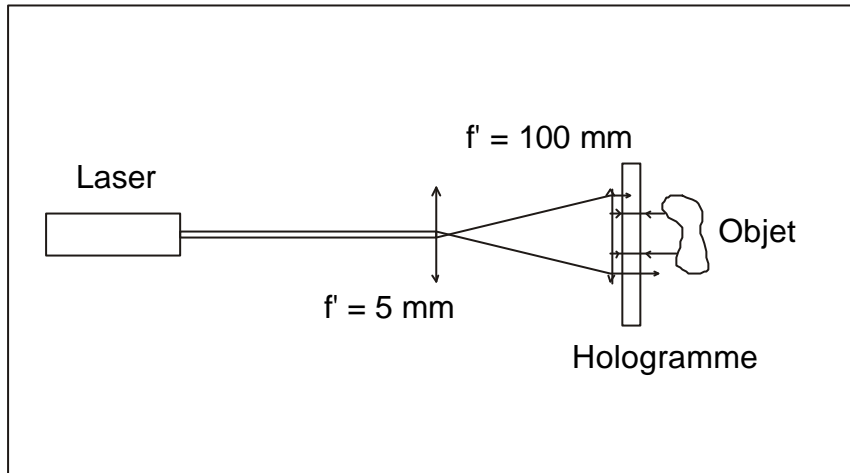
Voici le schéma d'enregistrement à deux ondes livré avec le banc Keybold :



Le polariseur sert à régler les intensités lumineuses relatives de l'onde de référence, en bas du schéma, et de l'onde envoyée par l'objet.

Sur les conseils de la responsable du musée de l'holographie du laboratoire d'optique de la faculté des sciences de Besançon, nous avons décidé d'employer la **méthode la plus simple** possible pour

réaliser un hologramme : Le faisceau de référence traverse la plaque photographique, se réfléchit sur l'objet à enregistrer placé tout près et choisi très réfléchissant. Nous avons collé sur des cartons du papier blanc ou du papier aluminium froissé, puis par dessus des pièces de monnaie maintenues à des distances différentes par de petites cales. Ainsi, les différences de marche entre les différents rayons sont limitées (il n'est pas nécessaire d'employer une source trop cohérente) et les intensités du faisceau de référence et de l'onde à enregistrer sont automatiquement voisines, ce qui conduit à une bonne visibilité des franges d'interférence.



La première lentille est un objectif de microscope, la deuxième est une lentille de focale 15 cm en fait et de diamètre assez grand, 72 mm. Nous verrons plus loin que le montage a encore été simplifié, en supprimant la lentille collimatrice de la diode laser, en retirant l'objectif de microscope et en choisissant une deuxième lentille de 33 cm de focale et de diamètre 75 mm.

Le banc Leybold (voir paragraphe suivant) supportant le montage est posé, ainsi que nous l'avons vu conseillé sur des sites Internet, sur une **chambre à air** pas trop gonflée (pneumatique de remorque, taille 130 / 70 - 10 environ), pour atténuer les **vibrations**. Il n'est pas indispensable, mais très pratique (supports magnétiques qui peuvent se fixer solidement où on veut) et efficace contre les vibrations. Des montages moins coûteux sont décrits sur Internet.

Pour déterminer le meilleur **temps de pose**, nous réalisons une plaque **test**, avec des zones différemment exposées, 5, 10 et 20 s. Pour cela, nous interposons un écran sur le trajet du faisceau étalé issu de la diode laser ; l'écran est tenu à la main en prenant garde à ne pas toucher le montage. Nous avons trouvé sur un site Internet des valeurs conseillées de 4 s, ou un peu plus, pour un hologramme en réflexion et un laser de 5 mW, 20 secondes pour un hologramme classique.

D'autres conseils ont été trouvés :

Enlever l'**optique** collimatrice de la diode laser, ainsi le faisceau est naturellement divergent et l'objectif de microscope destiné à étaler le faisceau n'est plus nécessaire,

pas de vibrations = pas d'air conditionné (le site doit être américain) et pas de musique,

obscurité totale, ou **lumière verte**, pour des plaques sensibles au rouge. Nous nous éclairons avec une batterie de 5 diodes électro luminescentes vertes montées en parallèle sur une plaque à bornes et alimentées par une alimentation Jeulin +15V (et -15V) qui est limitée en intensité à 100 mA,

faire chauffer le laser 40 minutes avant l'enregistrement pour prévenir des fluctuations de polarisation. Ce dernier conseil s'applique sans doute aux montages à deux ondes, où un polariseur placé sur le trajet de l'un des faisceaux, permet d'ajuster les amplitudes des ondes. Nous employons une diode

laser que nous allumons et éteignons comme une lampe ordinaire d'agrandisseur, avec l'interrupteur de son alimentation.

3 4 Premiers essais

Ce Mercredi après midi 16 Mai 2001 fut un grand jour !

Nous construisons en Meccano une glissière élastique, faite de deux cornières, pour tenir la plaque holographique. Un assemblage de Meccano et de pieds, tiges et noix de physique tient la glissière à hologramme et juste derrière, l'objet réfléchissant. Nous réglons l'alignement de la diode laser, puis posons le banc Leybold sur sa chambre à air.

Dans une toute petite cuvette (la plaque holographique ne mesure que 6,25 x 6,25 cm), nous versons du révélateur qui sera jeté à la fin de la séance. Dessus flotte une cuvette identique limitant l'oxydation. Le reste du révélateur est stocké dans un flacon à volume variable, en forme d'accordéon, l'air est chassé, le flacon bien bouché. Une autre technique consiste à remplacer l'air par des billes de verre.

Nous avons réalisé un éclairage de laboratoire à l'aide de 5 nos diodes électroluminescentes vertes, placées sur une plaque à bornes du lycée et alimentées en parallèle par une alimentation Jeulin limitée à 100 mA. Nous allumons nos diodes et faisons la quasi obscurité. Les membres du groupe qui sont restés derrière la porte nous donnent les secondes. Le premier hologramme est placé dans sa glissière (nous avons failli mettre à la place un carton de protection) ; il est exposé en trois bandes, 5, 10 et 20 secondes, avec une diode laser de 3 mW.

Le développement dure 2 minutes (prévoir des pinces pour développement des photos sur papier car les réactifs sont très caustiques), l'hologramme noircit un peu (densité grossièrement estimée à 1) ; il est plongé 30 secondes environ dans le bain d'arrêt, puis 2 minutes dans le fixateur ; il en ressort presque totalement transparent. Inquiétude !

Nous séchons notre hologramme à la va vite et le plaçons sur le montage de restitution (voir paragraphe suivant). Résultat : rien de rien. Consternation. Nous relisons la notice des réactifs ; il est normal que le fixateur ait rendu l'hologramme transparent ; l'exposition doit donc être à peu près correcte. Nous téléphonons à Claudine Bainier. Par bonheur, elle nous répond immédiatement :

« Ce n'est pas facile. Si vous avez enregistré en lumière rouge, il faudra restituer en lumière verte, car le fixateur enlève de la matière à l'émulsion et change la distance entre les franges. Si vous n'avez pas de laser vert, il est préférable d'utiliser de la lumière blanche. Avez-vous testé la stabilité de votre montage ? Il faudrait séparer le faisceau en 2 et créer un interféromètre et projeter les franges. Avez-vous mesuré la densité à la fin de la révélation ? Il faut développer jusqu'à une densité de 2. Vous pouvez employer vos diodes vertes pour tester la densité. »

Pendant ce temps, notre hologramme a continué à sécher ; il a changé d'aspect. Nous l'éclairons avec une lampe de bureau, halogène à basse tension, dont le filament a une très petite taille. En transmission, nous ne voyons rien ; en réflexion non plus ; nous inclinons l'hologramme dans tous les sens... Et nous apercevons une zone brillante ; c'est une partie du papier d'aluminium froissé. Et nous voyons l'une des pièces de monnaie. Ce n'est pas très visible, la zone utile est trop petite, mais ça marche.

Donc le montage est suffisamment stable, le temps d'exposition est en gros correct. La densité doit être trop faible.

Nous enregistrons un deuxième hologramme. L'exposition est de 12 secondes (sans doute un peu trop) avec une diode laser de 3 mW. Nous développons 2 minutes, prenons l'hologramme avec les pinces, le rinçons et examinons les diodes vertes à travers. Leur lumière est atténuée, mais moins de 10 fois semble-t-il (l'œil n'est pas un instrument de mesure), donc densité inférieure à 1. Nous reprenons le développement, 4 minutes au total. La densité est nettement plus grande, peut-être plus de 2.

Nous fixons 1 minute, comme indiqué dans le mode d'emploi ; l'hologramme est resté très sombre. Nous fixons 2 minutes en tout ; il s'éclaircit un peu mais reste trop noir. Il faudra soit réduire la durée de développement, soit celle d'exposition.

Nous le séchons à l'aide d'un sèche cheveux. Notre professeur réclame le privilège d'être le premier à regarder. Nous voyons deux pièces de monnaie.

3 5 Essais suivants

Nous décidons de mieux étaler le faisceau de la diode laser et de le nettoyer un peu, en supprimant la lentille collimatrice et l'objectif de microscope. La durée d'exposition sera ramenée à 8 secondes. Nous tenterons de placer une loupe sur une partie de l'hologramme.

Ceci est tenté le Mercredi 23 Mai. La lentille collimatrice est enlevée en dévissant la pièce qui la porte ; il faut forcer car celle-ci est collée. Il faut ensuite raccourcir le tube métallique qui contient la diode laser, car trop long, il réfléchit les parties extrêmes du faisceau. Celui-ci est très plat, à section rectangulaire. Nous devons nous placer à 32 cm de la diode laser, pour obtenir une tache de lumière longue de 34 cm, mais large de seulement 3 cm (environ) . Notre hologramme ne sera pas exposé sur toute sa surface, ou alors il faudrait se placer deux fois plus loin, le montage sortant du banc holographique Leybold. Pour rendre le faisceau parallèle, nous plaçons une lentille de 3 dioptries, ou 33 cm de distance focale. Nous remarquons que celle-ci a beaucoup moins d'aberrations que la lentille précédente de 15 cm de focale et que le faisceau est plus propre.

Nous évaluons le temps d'exposition à environ 20 secondes. Précédemment, il fallait 8 secondes ; le faisceau est 2 fois plus étalé, donc l'énergie est répartie sur une surface 4 fois plus grande, mais il n'y a plus les pertes dues à l'objectif de microscope et à la lentille collimatrice. Nous tentons 20 secondes de temps de pose ;

Premier essai : Pose 20 secondes, développement 1 min 30 s ; la plaque est très sombre ($D = 2,5 ?$). Fixation 2 min. La plaque ressort totalement transparente.

Nous discernons une pièce et un tout petit bout de papier d'aluminium.

Deuxième essai : Exposition 10 secondes, développement 2 min ($D = 2 ?$) puis 2 min 30 s ($D = 2,5 ?$) ; fixation 1 min, plaque encore noire, 1 min 30 s, plaque à peine grise et s'éclaircissant au rinçage.

C'est nettement mieux, 3 pièces sont visibles et un morceau du papier d'aluminium.

Troisième essai : Pose 8 secondes (après débat pour savoir si on ne pourrait pas descendre à 5 s), développement 2 min ($D = 1,5 ?$), 2 min 30 s ($D = 2 ?$), 3 min ($D = 2,5 ?$). La plaque est très sombre, trop sombre ?). Fixation 1 min 30 s. La plaque est très claire.

Une seule pièce est visible. Le deuxième essai était meilleur.

Quatrième essai : Nous changeons de sujet, 3 pièces de monnaie avec une loupe les recouvrant partiellement.

Pose 10 s, développement 2 min 30 s ($D = 2 ?$), fixation 1 min 15 s. Plaque encore un peu grise, avec deux bandes plus noires en diagonale.

Les pièces sont bien visibles, mais la loupe apparaît comme un disque sombre, derrière lequel les pièces sont un peu visibles.

Cinquième essai : Nous enlevons la loupe.

Pose 10 s, développement 2 min, fixation 1 min.

Le résultat est très bon (pour nous), les 3 pièces et le papier d'aluminium sont bien visibles.

Sixième essai : Un petit sujet avec une clé, une pièce et un fond de papier dans lequel des lettres sont découpées, laissant apparaître un miroir.

Mêmes conditions que pour le cinquième hologramme. Il ressort un peu noir, mais la restitution est bonne.

Nous le repassons dans le fixateur ; en 15 s, il devient transparent (nous travaillons en lumière du jour). La restitution est toujours bonne, voire meilleure.

3 6 Conclusion

Le temps de pose est de l'ordre de 10 secondes (pour un hologramme en réflexion), à 32 cm de la diode laser de 3 mW, sans sa lentille collimatrice, le faisceau s'étalant selon un rectangle d'environ 3 x 34 cm. Le laboratoire peut être éclairé par des diodes électroluminescentes vertes. La durée de développement est de l'ordre de 2 minutes (en observant les diodes vertes à travers l'hologramme nous constatons qu'il est sombre mais pas trop, la densité doit être de l'ordre de 2), le passage dans le bain d'arrêt dure quelques secondes. Le passage dans le fixateur dure environ 1 minute ; il est conseillé d'allumer la lumière au bout de 45 secondes, pour observer l'éclaircissement de l'hologramme. Il faut ensuite rincer plusieurs minutes dans l'eau et sécher complètement.

Lors de la restitution, il faut se méfier des artefacts : les zones restées légèrement grises, en réflexion, peuvent faire apparaître une image (en noir, gris et blanc). Cela s'observe aussi sur des négatifs noir et blanc classiques peu développés. La restitution holographique est une image de couleur rouge, qui bouge beaucoup, lorsqu'on tourne légèrement la plaque sous la lampe basse tension halogène, contrairement à la précédente.

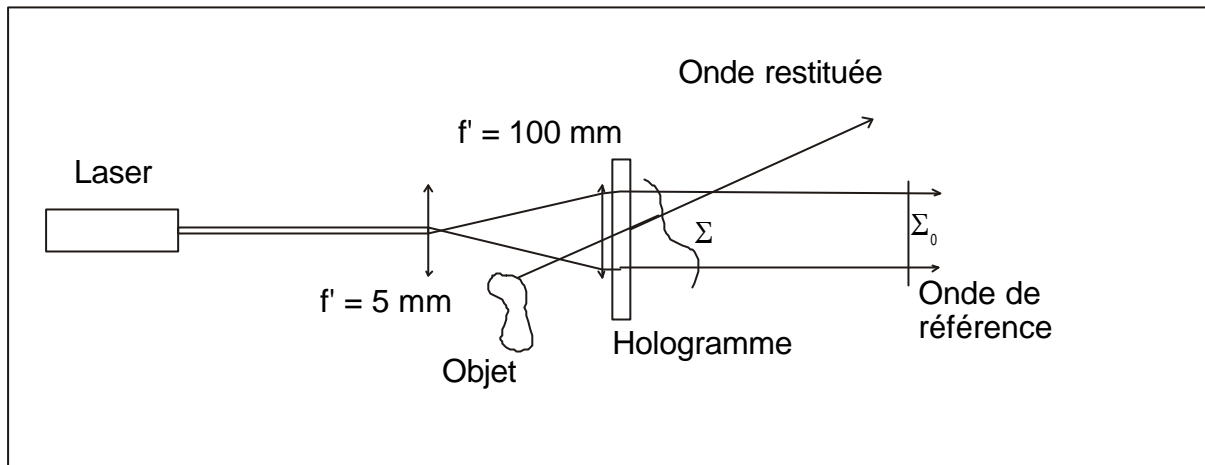
4 Restitution

Les expériences de restitution ont commencé avant celles d'enregistrement.

Nous avons emprunté à l'IUFM (Mathilde Bugnon, mathilde.bugnon-henriet@libertysurf.fr), un banc Leybold servant de support pour la réalisation d'hologrammes (Il n'est pas du tout indispensable pour la restitution, mais bien pratique tout de même).

Dans un premier temps, nous l'avons employé pour restituer un hologramme possédé par le laboratoire du lycée, d'abord avec un laser, ensuite avec une diode laser. Il faut pour cela étaler le faisceau laser, à l'aide d'une lentille de courte distance focale (objectif de microscope) et d'une lentille

de 10 ou 15 cm de focale. Nous pouvons simplifier encore le montage en enlevant la lentille collimatrice de la diode laser et l'objectif de microscope. Voici le schéma du montage :



La première lentille est un objectif de microscope, la deuxième est une lentille de focale 15 cm en fait et de diamètre assez grand, 72 mm.

Nous avons essayé de changer l'angle d'incidence de l'onde plane éclairant l'hologramme, pour nous apercevoir qu'une variation de 10° ne modifiait pas la restitution. Nous avons ensuite retourné l'hologramme : L'objet restitué l'a été de l'autre côté du faisceau de référence. Nous avons ensuite tourné l'hologramme, pour constater que le faisceau de lumière restituant l'objet tournait en même temps.

Nous avons aussi restitué des hologrammes en réflexion, du commerce, à l'aide d'une lampe de bureau halogène, basse tension. Ceux que nous avons enregistré se restituent de la même manière.

Bien d'**autres idées** sont à l'étude, car l'enregistrement précédent ne peut être effectué lors du concours à Paris, mais patience ! En voici une qui commence à prendre corps :

5 Hologramme généré par calcul, ou computer generated hologram, CGH

5 1 Premières recherches, premiers essais

Nous ne vous l'avions pas dit, mais depuis un certain temps, l'essentiel de notre travail a consisté à tenter de créer des hologrammes par calcul informatique. Nous avons trouvé beaucoup de sites Internet traitant ce sujet et nous avons contacté certains auteurs, nous avons aussi participé à des forums de discussion. Pour cela, cherchez, à l'aide de Metacrawler, les mots clés : Computer generated hologram ou Computer generated holography ou cgh.

Nous avons obtenu une réponse charmante du directeur du M.I.T. nous disant qu'il fallait faire de la transformation de Fourier (FFT) en deux dimensions, que c'était comme en une dimension, mais avec deux dimensions et que notre professeur nous expliquerait tout cela.

Mais personne n'a accepté de nous donner du code source. Certains nous ont même demandé de leur communiquer les logiciels que nous avons trouvés sur Internet, ce que nous avons fait ; mais ils ont même oublié de nous dire merci. Il semble que beaucoup travaillent encore sur le sujet, mais ne veulent rien communiquer. Parfois ils évoquent des résultats passionnants qu'ils ont trouvés, sans en

dire plus et en même temps incitent ceux qui auraient des idées originales sur le sujet à les leur communiquer (les petits malins !). Certains indiquent qu'ils ont beaucoup de mal et que les résultats sont décevants (les plus sincères ?).

Nous avons trouvé un logiciel, bridé (hologramme de 50 x 50 pixels) fonctionnant selon le processus suivant : Choix d'une figure simple, attribution d'une phase aléatoire entre 0 et 2 Pi radians à chaque point de la figure (pour obtenir un éclaircissement plus uniforme de l'hologramme calculé), calcul de la transformée de Fourier à deux dimensions, selon une méthode curieuse, puisque le calcul ne s'arrête que lorsqu'on le décide, la transformée évoluant d'abord rapidement au cours du temps, puis ensuite plus lentement. Rien n'est prévu pour imprimer l'hologramme obtenu à l'écran ; nous avons donc fait Impr écran et transféré l'hologramme minuscule dans un logiciel de dessin (Paint), pour l'imprimer. Mais le résultat n'a pas été concluant.

Un autre logiciel a été testé, mais il donne l'hologramme sous la forme d'un fichier postscript qu'il faut ensuite traduire pour l'imprimer. Nous avons renoncé pour l'instant.

5 2 Notre premier logiciel

Nous avons alors, aidés par notre professeur, commencé à rédiger notre propre programme, en Delphi (turbo Pascal). Les premiers résultats ont donné de superbes figures sur l'écran de notre ordinateur, avec plein de cercles se croisant dans tous les sens ; mais quant à la restitution du sujet, rien de rien.

Nous avons alors simplifié le logiciel pour qu'il crée l'hologramme d'un seul point lumineux. Il a donné des disques alternativement rouges et noirs à l'écran, blancs et noirs sur le papier ou le transparent. Et merveille, ce Mercredi 11 Avril, non seulement le point a été restitué, mais de plus, l'hologramme s'est comporté comme une lentille **convergente** ; en fait, nous avons réalisé une **lentille zonée** de Fresnel.

Le montage de restitution peut donc être grandement simplifié.

Par contre il y avait une grave erreur sur les distances (focales), environ 8 fois plus faibles que prévues. Le logiciel a été immédiatement revu. Les focales n'étaient plus que 2 fois trop faibles, mais surtout, nous avons pu restituer plusieurs points, formant une image très simple. Cependant, des points parasites brouillaient l'observation.

Conclusions provisoires : Les disques parasites (très jolis) sur l'hologramme et les points parasites à la restitution sont dus à des artefacts de calcul qui se produisent quand les franges d'interférence sont trop serrées par rapport à ce que peut rendre l'écran de l'ordinateur, ou l'imprimante. A ce sujet, l'imprimante Laserjet HP, donnée pour une résolution de 600 points par pouce (avec RET), semble plafonner à 300, car il y a plus d'artefacts sur le transparent imprimé que sur l'écran.

Pour réduire ces artefacts splendides, il faut éloigner le point source (imaginaire) de l'hologramme. Une autre méthode trouvée sur Internet consiste à limiter (par le calcul) l'angle solide d'émission de lumière des points sources, pour que les ondes qu'ils 'émettent' n'interfèrent pas entre elles.

5 3 Calculer un hologramme

Maintenant que, nous l'espérons, l'eau vous est venue à la bouche, entrons dans le détail des calculs. Sachez que notre premier logiciel est disponible en télé chargement gratuit sur ce site (l'exécutable PC compilé pour ceux, les malheureux, qui ne disposent pas de Delphi), avec aussi son code source

Turbo Pascal pour Delphi (ou Kylix) de Borland pour ceux qui veulent le personnaliser (en citant les auteurs, ce serait bien aimable), avec encore un fichier d'aide Windows et ce document explicatif au format .pdf, lisible avec Adobe Acrobat. Il vous permettra d'étudier la diffraction, les interférences, le principe du retour inverse de la lumière et bien sur l'holographie d'objets très simples formés d'un maximum de 16 points lumineux sur deux plans différents (pour l'instant, mais des améliorations sont en cours).

Pendant que nous y sommes, indiquons que le calcul a été simplifié, à partir de renseignements obtenus sur Internet et confirmés par nos propres calculs. Il est inutile d'ajouter une onde de référence aux ondes (calculées) émises par les points sources. Il suffit d'ajouter toutes les parties réelles des contributions des différents points sources lumineux, et de normaliser le résultat, c'est à dire d'ajouter à chaque valeur réelle trouvée un nombre permettant de n'obtenir que des résultats positifs (minima voisins de zéro), et de multiplier le tout par un coefficient tel que le maximum soit de 255 pour l'écran (pour une image monochrome) et de 1 pour l'imprimante. Pour imprimer, tout cela peut être encore simplifié, car finalement l'imprimante ne connaît que deux valeurs, 0 (point noir) ou 1 (point blanc). Nous pouvons donc nous contenter du test : partie réelle négative ou nulle -> noir ; positive -> blanc.

L'erreur sur la distance de convergence a été trouvée ; il s'agissait d'un facteur $2p$ oublié dans le calcul de la phase de l'onde.

Voilà où nous en sommes ; cela semble prometteur.

5 4 Principe de l'holographie (traditionnelle)

Nous allons développer ici les calculs, plus que sur notre site Internet, le langage html se prêtant mal à l'écriture des formules.

Un objet, lumineux par lui-même, ou éclairé, envoie vers notre œil une onde Σ . Nous noterons Σ l'expression réelle de l'onde et $\underline{\Sigma}$ son écriture sous forme complexe, donc $\Sigma = \text{Re}(\underline{\Sigma})$. Si, par un procédé quelconque, nous parvenons à créer cette onde Σ sans utiliser l'objet, notre œil la recevant aura la parfaite illusion de voir l'objet, en trois dimensions donc, à travers la 'fenêtre' constituée par le cadre de l'hologramme.

Le cas le plus simple est celui où l'onde émise par l'objet est cohérente : chaque point de l'objet émet la même fréquence ν , correspondant à la même pulsation $\omega = 2p\nu$, que les autres points, avec une différence de phase ϕ par rapport aux points voisins, toujours la même. Arrivée sur l'hologramme, la superposition de ces ondes cohérentes, donne une onde Σ , de fréquence ν , d'amplitude A_{xy} variant d'un point à l'autre de l'hologramme, puisque la superposition donne des interférences qui peuvent être constructives ou destructives, et de terme de phase ϕ_{xy} variant lui aussi d'un point à un autre de l'hologramme. C'est cette onde Σ qu'il faut recréer. Pour cela, comme l'hologramme transparent est éclairé par l'onde de référence Σ_0 , il serait intéressant d'enregistrer l'amplitude A_{xy} et le terme de phase ϕ_{xy} ; il faudrait créer un hologramme plus ou moins transparent pour jouer sur l'amplitude et plus ou moins épais pour changer le terme de phase. Mais une émulsion photographique ne peut que noircir plus ou moins selon l'énergie, donc le carré de l'amplitude de l'onde lumineuse qui la frappe (et encore de façon non linéaire), en aucun cas la phase ϕ_{xy} .

Lors de l'enregistrement, on superpose donc à l'onde Σ provenant de l'objet une onde de référence Σ_0 de même fréquence ν , plane par exemple, qui est obtenue en divisant par un miroir semi transparent l'onde produite par le laser : une partie du faisceau laser étalé éclaire l'objet, qui devient

donc une source cohérente de lumière, l'autre sert de référence et frappe directement l'hologramme. Dans le montage simplifié que nous avons retenu, ce miroir n'est pas utile, car le faisceau laser étalé (de référence donc) traverse la plaque photographique, puis se réfléchit sur l'objet situé derrière et revient former l'hologramme.

Calculons l'éclairement frappant l'hologramme ; il est proportionnel à :

$\|\Sigma + \Sigma_0\|^2 = (\underline{\Sigma} + \underline{\Sigma}_0)(\underline{\Sigma} + \underline{\Sigma}_0)^*$, avec * signifiant complexe conjugué. Cette expression peut s'écrire : $\|\Sigma\|^2 + \|\Sigma_0\|^2 + \underline{\Sigma}\underline{\Sigma}_0^* + \underline{\Sigma}_0^*\underline{\Sigma}$ ou encore : $\|\Sigma\|^2 + \|\Sigma_0\|^2 + \underline{\Sigma}\underline{\Sigma}_0^* + (\underline{\Sigma}\underline{\Sigma}_0^*)^*$.

Les deux premiers termes n'ont pas d'intérêt lors de la restitution (le premier correspond à l'éclairement de l'hologramme sous le seul effet de l'onde venant de l'objet, le deuxième à l'éclairement dû seulement à l'onde de référence) ; ils permettent cependant à l'expression de ne jamais être négative. Le troisième terme peut s'écrire :

$2 \operatorname{Re}(\underline{\Sigma}\underline{\Sigma}_0^*)$. C'est ce seul terme qui sera conservé dans le calcul de l'hologramme, à une constante multiplicative près, et rendu toujours positif, par ajout d'une constante, ou par un test logique.

Supposons que la transmittance de la plaque holographique développée soit une fonction linéaire de cet éclairement. En fait, au mieux, il ne peut s'agir que d'une fonction affine, puisque l'émulsion noircit, donc transmet moins la lumière lorsqu'elle est éclairée. Mais y a-t-il linéarité au sens du physicien ? Nous n'aurons pas le temps d'effectuer des mesures, mais notre professeur se rappelle avoir étudié la question et avoir constaté que le comportement de l'émulsion photographique n'est pas le même selon que l'exposition se fait à durée constante, ou à éclairement constant ; à éclairement constant et durée variable (ce qui ne correspond pas à la réalité de l'usage d'une plaque photographique, mais est plus commode à réaliser), le comportement n'est pas du tout linéaire ; par contre à durée constante et éclairement variable, la courbe transmittance en fonction de l'éclairement présente une partie linéaire.

Eclairons cet hologramme développé, à l'aide du faisceau de référence ; le faisceau émergent peut s'écrire :

$$\Sigma_0 \left[\|\Sigma\|^2 + \|\Sigma_0\|^2 + \underline{\Sigma}\underline{\Sigma}_0^* + (\underline{\Sigma}\underline{\Sigma}_0^*)^* \right].$$

Les deux premiers termes correspondent à peu près à une onde Σ_0 car les deux premiers termes entre crochets sont les éclairagements de l'hologramme donnés par l'onde de référence Σ_0 seule et l'onde Σ seule, donc à peu près constants. Les deux autres termes peuvent s'écrire, l'expression entre crochets étant réelle :

$$\Sigma_0 \left[\underline{\Sigma}\underline{\Sigma}_0^* + (\underline{\Sigma}\underline{\Sigma}_0^*)^* \right] = \operatorname{Re} \left\{ \Sigma_0 \left[\underline{\Sigma}\underline{\Sigma}_0^* + (\underline{\Sigma}\underline{\Sigma}_0^*)^* \right] \right\} \text{ soit encore,}$$

$\operatorname{Re} \left\{ \|\Sigma_0\|^2 \underline{\Sigma} \right\} + \operatorname{Re} \left\{ \underline{\Sigma}_0^2 \underline{\Sigma}^* \right\}$ ou $\|\Sigma_0\|^2 \Sigma + \operatorname{Re} \left\{ \underline{\Sigma}_0^2 \underline{\Sigma}^* \right\}$. Le premier terme est l'onde Σ restituée puisque l'onde de référence est supposée avoir une amplitude constante. Si l'onde de référence est plane, le deuxième terme correspond à une onde Σ dont les termes (ou retards) de phase ϕ_{xy} seraient changés de signe.

Il est clair que plus l'angle formé par les directions de propagation des ondes Σ et Σ_0 est grand, plus les ondes qui émergent de l'hologramme à la restitution, onde utile (Σ) et ondes parasites (Σ_0 etc.) seront faciles à séparer, mais aussi plus les franges d'interférence seront fines, nécessitant une émulsion spéciale à grain extrêmement fin. Ce problème va devenir critique avec les hologrammes calculés, puis imprimés.

5 5 Principe du calcul d'un hologramme

A partir d'un objet imaginaire, il s'agit de calculer point par point l'éclairement au niveau de l'hologramme, d'imprimer le tout sur un transparent, puis de procéder à la restitution.

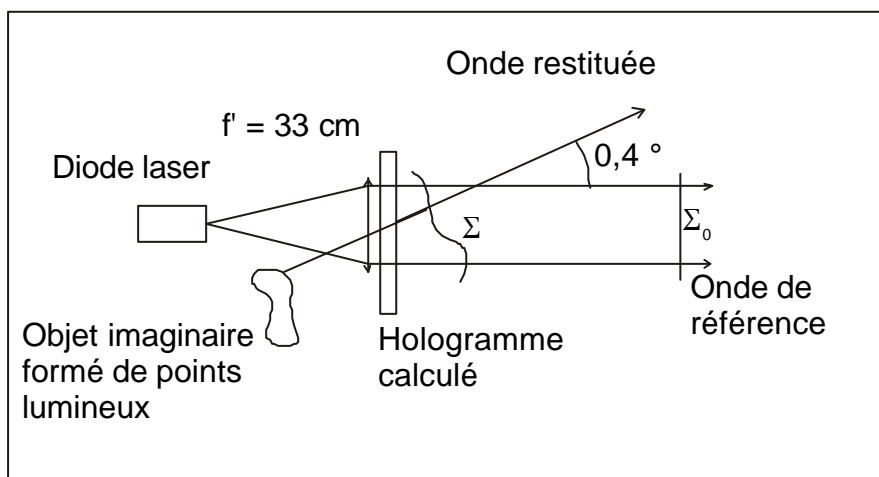
En fait, les calculs peuvent être simplifiés : Il n'est pas nécessaire de calculer la superposition des ondes Σ et Σ_0 , mais seulement l'amplitude de l'onde Σ , sans son terme en $j \mathbf{w}t$. En effet, si la transmittance de l'hologramme transparent calculé puis imprimé est proportionnelle (en fait, affine) à $A \cos(\mathbf{f})$, l'onde émergent de cet hologramme éclairé par l'onde de référence $A_0 \cos(\mathbf{w} \cdot t)$ est :

$$A_0 \cos(\mathbf{w} \cdot t) \cdot A \cos(\mathbf{f}), \text{ soit } \frac{A_0 A}{2} [\cos(\mathbf{w} \cdot t + \mathbf{f}) + \cos(\mathbf{w} \cdot t - \mathbf{f})].$$

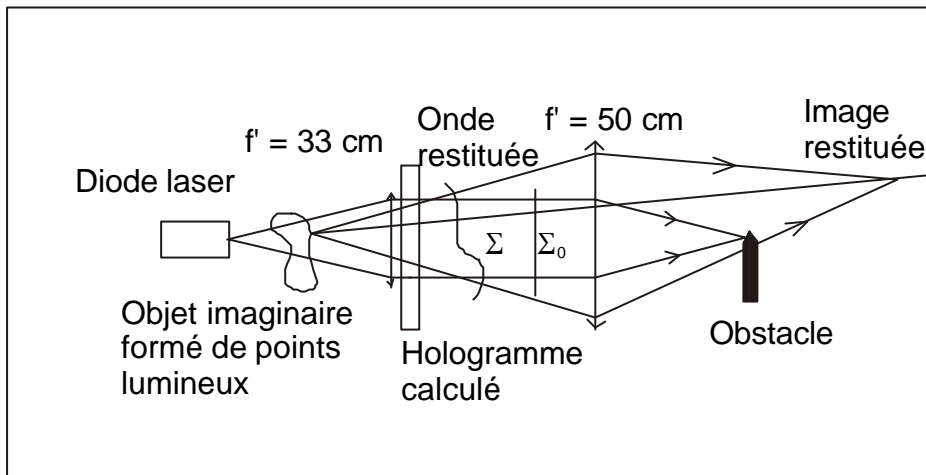
A une constante multiplicative près, le premier terme est l'onde Σ . Si l'objet est un point lumineux, le premier terme restitue celui-ci, donc un point situé à distance finie, avant l'hologramme, qui pourra être observé en regardant dans l'hologramme, avec le risque de se brûler les yeux ; il sera aussi possible de former l'image de ce point sur un écran, à l'aide d'une lentille convergente de 2 dioptries, placée contre l'hologramme. Mais il y a encore plus simple, puisque le deuxième terme est une onde convergente. L'hologramme se comporte alors comme une lentille à la fois convergente et divergente.

Car de sérieuses difficultés surgissent :

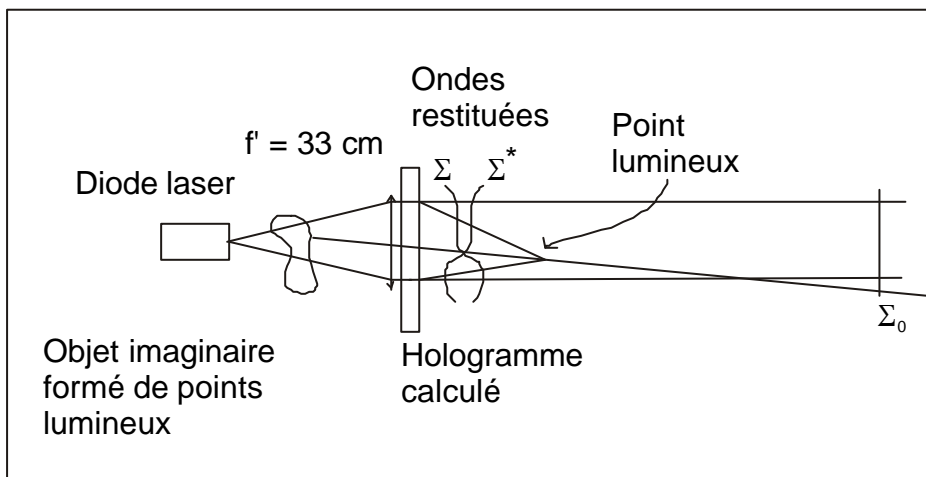
La finesse des franges est limitée par les capacités de l'imprimante. Avec une Hewlett Packard LaserJet de résolution 600 points par pouce, **l'angle** entre les ondes Σ et Σ_0 **n'est que de 0,4 °**. L'observation directe est donc délicate, avec le risque de recevoir dans l'œil les deux faisceaux Σ et Σ_0 à la fois. Certains auteurs sur Internet proposent donc d'imprimer l'hologramme, puis de le photographier en réduction sur microfilm, pour resserrer les franges d'interférence, donc écarter Σ et Σ_0 , mais cela nous éloigne de notre objectif qui est de calculer un hologramme justement pour ne pas avoir à attendre à cause d'un processus de développement chimique.



Une solution est de former l'image des points lumineux imaginaires sur un écran, à l'aide d'une lentille de 50 cm de distance focale, accolée (contrairement au schéma suivant) à l'hologramme. Ainsi l'image de la diode laser, point de convergence de l'onde plane de référence Σ_0 , est au foyer image de la lentille, à 0,5 mètre de celle-ci ; un obstacle est placé pour arrêter cette lumière. Les images des points imaginaires sont plus loin et l'obstacle laisse passer une partie de la lumière nécessaire pour les former. Des points imaginaires situés à 1 et 1,5 mètre derrière l'hologramme donnent des images à 1 et 0,75 mètre après la lentille ; l'observation en plaçant l'œil dans le faisceau est à éviter cependant ; nous employons un écran :



Il y a encore plus simple, car les hologrammes calculés sont convergents (et divergents à la fois), donnant des images réelles. Celles-ci apparaissent comme des points lumineux dans le faisceau de référence Σ_0 qui est une onde plane étalée ; un simple écran permet donc de les observer, sans risque d'éblouissement. Il est même possible de calculer un hologramme dont une grande partie de la surface est noire, ce qui atténue d'autant l'onde de référence Σ_0 :



Qui plus est, la taille de ces hologrammes convergents n'est pas limitée, si lors du calcul on limite l'angle solide d'émission de lumière de chaque point lumineux pour que sa figure d'interférences ne dépasse pas un cercle d'une cinquantaine de pixels ! Nous avons retenu des hologrammes de 600 x

600 pixels, soit 1 pouce carré, soit encore 25 x 25 mm, pour notre montage de restitution dont la deuxième lentille de marque Leybold a une distance focale de 15 cm, pour un diamètre de 7,2 cm. Nous pouvons calculer des hologrammes plus grands, car notre laserJet ayant une mémoire de 500 kilo octets, cela représente $500\ 000 \times 8 = 4\ 000\ 000$ pixels soit une taille maximale de 2000 x 2000 pixels, soit 83 x 83 mm. Au-delà, la mémoire 'explose', ce qui produit un plantage de l'ordinateur. Par contre, pour des hologrammes aussi grands, les aberrations géométriques de la deuxième lentille, chargée de créer une onde plane étalée, apparaissent et tous les points objets lumineux (imaginaires) situés dans un même plan ne donnent pas des faisceaux lumineux convergeant dans un même plan ; de belles aberrations apparaissent sur les bords. La lentille employée ensuite, de diamètre équivalent, mais de focale deux fois plus longue, donne moins d'aberrations et permettrait de restituer des hologrammes plus grands.

La deuxième difficulté tient au fait que l'imprimante ne connaît que **deux 'valeurs'**, blanc ou transparent et noir. Il est impossible d'utiliser des nuances de gris que l'imprimante réalise par un tramage noir et blanc, ce qui au niveau de la diffraction doit être amusant. Il faudrait une imprimante jet d'encre injectant des encres plus ou moins diluées et qui n'existe pas à notre connaissance. Nous devons donc arrondir sauvagement les résultats de nos calculs. Le plus simple est de décider : Partie réelle du résultat calculé négative ou nulle -> noir et partie réelle positive -> blanc ou transparent. Mais ce manque de linéarité (c'est le moins qu'on puisse dire) ne permet pas la restitution correcte de n'importe quel sujet. Si nous imaginons deux points lumineux, à la même distance de l'axe optique, l'un derrière l'autre à 1 et 1,5 mètre de l'hologramme, leur restitution n'est pas claire. La restitution d'objets plus compliqués (voir plus loin le cas de pavés lumineux) n'est pas très satisfaisante.

La troisième difficulté tient au **temps de calcul**. Supposons que notre objet ait une taille de 600 x 600 pixels ; il comporte donc 360 000 points. L'hologramme est choisi de même taille. Pour chaque point calculé de l'hologramme, il faut tenir compte de la contribution de chacun des points de l'objet, soit $360\ 000 \times 360\ 000$ calculs, chaque calcul comportant une recherche de distance parcourue par le rayon lumineux ; soit donc 130 milliards de calculs. Si chaque calcul consomme 77 cycles d'horloge, cela donne 10^{13} cycles soit 100 000 secondes pour un processeur fonctionnant à 100 MHz, soit encore 28 heures. Même avec le meilleur ordinateur de notre laboratoire de physique, nous ne pouvons atteindre l'objectif fixé d'une présentation en 20 minutes.

Pour tourner cette difficulté, une hypothèse simplificatrice est de dire que l'hologramme s'obtient à partir de la transformée de Fourier (en deux dimensions) de la répartition d'amplitude dans l'objet lumineux imaginaire. Les physiciens savent faire des transformées accélérées, ou FFT ; mais il nous faudrait nous plonger dans la FFT en 2 dimensions.

Nous avons pour l'instant retenu une autre solution : Nous envisageons un objet formé d'un nombre restreint de points lumineux. Si par exemple l'objet comporte 100 points, la durée de calcul sera ramenée à $100 \times 360\ 000 \times 77$ soit 3 milliards de cycles, soit 30 secondes, ce qui est raisonnable.

Dans le même ordre d'idées, nous avons envisagé de construire un objet à l'aide de pavés lumineux. Nous avons commencé par un calcul formel, à l'aide du logiciel *Mathematica*, mais celui-ci nous a répondu par une fonction spéciale Erfi, fonction d'erreur imaginaire qui n'est pas connue de notre logiciel de programmation, Delphi de Borland Inprise. Nous avons donc cherché une solution approchée :

Si un point A du pavé a une contribution S, le point voisin A' a une contribution S', $\underline{S'}$ se déduisant de \underline{S} en écrivant $\underline{S'} = \underline{S} \cdot r$. Si on considère une bande B horizontale dans le pavé, la somme des

contributions, $\underline{B} = \underline{S} + \underline{S}' + \underline{S}''$ se ramène à une progression géométrique de raison \underline{r} , en admettant que le facteur \underline{r} varie de façon négligeable d'un point au suivant. La contribution d'une deuxième bande, \underline{B}' se déduit de la première de la même manière, $\underline{B}' = \underline{B} \cdot \underline{g}$. La contribution d'un pavé se déduit donc de celle du point constituant son sommet en haut à gauche, par deux séries géométriques successives, donc un calcul à peine plus long que celui nécessité par un point lumineux.

Mais pour l'instant, nous avons un problème à la restitution : Nous ne voyons apparaître que les quatre coins du pavé. Cela semble dû au fait que la figure d'interférences sur l'hologramme est d'amplitude très variable, le centre de la figure d'interférences étant très lumineux et les bords plus sombres, avec des détails dans les parties lumineuses et sombres. Or notre imprimante est incapable avec son noir et blanc de restituer quelque chose de correct. Pour l'instant, nous avons privilégié à l'impression les bords de la figure d'interférences ; nous cherchons à voir si en privilégiant le centre un résultat meilleur peut être obtenu.

6 Hologramme en ultra sons

Ce sera sans doute la dernière partie de notre recherche. L'idée de départ est de remplacer l'onde lumineuse par une onde ultra sonore (qui peut se propager dans des milieux opaques à la lumière). Plusieurs méthodes se présentent :

- 'Eclairer' l'objet à l'aide d'un faisceau d'ultra sons, superposer l'onde Σ et Σ_0 (faisceau direct) et dans un plan enregistrer l'amplitude (ou son carré) de l'onde résultant de la superposition. Le récepteur est un deuxième émetteur d'ultra sons ; il délivre une tension proportionnelle aux variations de pression qu'il subit. Mesurer cette amplitude suppose échantillonner à une fréquence très supérieure aux 40 KHz des ultra sons, ou réaliser un petit montage électronique ne gardant que l'amplitude d'un signal électrique, inspiré par exemple du détecteur de crête employé en démodulation d'amplitude, dans le programme de spécialité de physique de Terminale S.
- Il n'est pas nécessaire de séparer en deux le faisceau ultrasonore ; deux émetteurs raccordés au même générateur peuvent convenir (contrairement à l'optique où il est impossible d'employer deux lasers). La superposition peut même être remplacée par l'addition électronique du signal Σ détecté et de la tension donnée par le générateur basse fréquence, avec des coefficients convenables
- Mais si on retient l'idée précédente de n'imprimer que la partie réelle (sans le terme en ωt) de la tension électrique proportionnelle au signal Σ , celle-ci peut être obtenue à l'aide d'un circuit multiplicateur ; en effet si on écrit $\Sigma_0 = A_0 \cos(\omega t)$, Σ_0 pouvant être la tension de sortie du générateur basse fréquence, et $\Sigma = A_{xy} \cos(\omega t - \mathbf{f})$, le produit de ces deux expressions peut s'écrire : $\frac{1}{2} A_0 A_{xy} [\cos(2\omega t - \mathbf{f}) + \cos(\mathbf{f})]$. Le premier terme de fréquence 80 kHz peut être éliminé facilement par un filtre passe bas ; le deuxième terme est celui recherché. Si le capteur est fixe, il reçoit un signal à fréquence nulle ; s'il est mobile dans le plan d'enregistrement, la fréquence peut être assez basse pour que nos cartes d'acquisition Candibus, lentes, le mesurent.

Une difficulté technique qui reste à résoudre est de contrôler le balayage du récepteur d'ultra sons, tout en enregistrant son signal. Notre carte Candibus n'est capable que de donner des valeurs logiques en sortie, pas des tensions. Un point lumineux peut ici être simplement remplacé par un émetteur de petite taille ; en raccordant plusieurs émetteurs au même générateur basse fréquence, il est facile de réaliser des sources synchrones.

Il reste à trouver la correspondance entre le travail en lumière visible et en ultra sons, car les longueurs d'ondes sont très différentes, 633 nm pour le laser et 8,5 mm pour les ultra sons, soit 13 000 fois plus. Mais lors de l'impression d'un hologramme transparent, nous pouvons choisir l'échelle de reproduction.

A suivre...

7 Imagerie en trois dimensions

A l'heure actuelle, la solution couramment retenue n'est pas l'holographie, mais la tomographie ; l'objet est analysé tranche par tranche et l'image 3 D est reconstituée de manière informatique. Mais des lasers X sont en train d'apparaître et modifieront peut-être l'approche de l'imagerie.

9 Applications actuelles de l'holographie