

Holographie : un outil simple pour l'enseignement du secondaire au supérieur

A. Escarguel

alexandre.escarguel@univ-provence.fr

Espace Culture de l'Université de Provence (ESCUP), case 1, 3 place Victor Hugo, 13331 Marseille Cedex 3 /

Laboratoire PHIM, UMR 6633 CNRS, case 321, Université de Provence, av. Escadrille Normandie-Niemen, 13397

Marseille Cedex 20, France.

RESUME : le présent article présente comment il est possible de mettre en œuvre simplement l'holographie, sans la nécessité de dispositifs lourds et onéreux. Des exemples d'utilisation dans l'enseignement universitaire classique (licence générale de physique 1^{ère} année, master professionnel instrumentation optique et laser, ...) et en diffusion scientifique (élèves et enseignants du secondaire) sont ensuite présentés. Une démonstration pratique de réalisation accompagnera l'article pendant la conférence.

Mots clés : holographie, interférences laser.

Introduction

Les principes de base interférentiels utilisés en holographie ont été posés par le prix Nobel Gabriel Lippmann à la fin du XIX^{ème} siècle [1]. Il avait développé une technique permettant de réaliser des photographies en couleurs réelles par un principe interférentiel de la lumière naturelle. La complexité du procédé, due à la très faible cohérence de ce type de lumière (de l'ordre du micromètre) a fait qu'il a été rapidement abandonné au profit du principe de la trichromie développée par Charles Cros et Louis Ducos du Hauron. Cette dernière est encore utilisée de nos jours et ne permet qu'une approximation de la reproduction des couleurs, à la différence de la technique de Gabriel Lippmann.

Le principe de l'holographie a été inventé par Dennis Gabor en 1947 [2] pour lequel il a reçu le prix Nobel de physique en 1971. Il a pu, alors que la source de lumière cohérente par excellence n'existait pas, réaliser un hologramme, dans des conditions expérimentales difficiles. Cependant, il a pu contourner par des astuces expérimentales les obstacles qui lui auraient interdit de réaliser un hologramme avant l'invention du laser : obtention d'une longueur de cohérence supérieure à celle de la lumière naturelle, quoique très inférieure à la plupart des lasers, et choix d'un montage expérimental permettant d'utiliser des pellicules photographiques de faible résolution. Les applications de l'holographie sont nombreuses : HVD, successeurs potentiels des DVD et des BLU-RAY, mesures de déplacements interférométriques, muséographie, optiques holographiques (réseaux, filtres « notch »...), authentification d'objets, œuvres artistiques.... C'est aussi un outil pédagogique très intéressant, car il questionne inévitablement toute personne qui se retrouve pour la première fois devant un hologramme. C'est assurément le premier pas vers un désir de comprendre qui peut motiver l'acquisition de connaissances souvent complexes :

étude des sources de lumière cohérentes, polarisation, interférences, ... D'autre part, la réussite d'un hologramme est une réalisation concrète très valorisante. Il est donc intéressant que ce type de technique puisse se développer, de même qu'il est possible à tout un chacun de faire et développer des photographies noir et blanc chez soi.

Principes de réalisation d'un hologramme

L'holographie est basée sur un principe simple (figure 1) : l'interférence de deux faisceaux issus d'une même source de lumière cohérente, l'un envoyé sur l'objet dont on veut faire l'hologramme (faisceau «objet») avant de rencontrer le support photosensible sur lequel sera réalisé l'hologramme, et l'autre arrivant directement sur le même support (faisceau «référence»). Si la longueur de cohérence de la source, distance correspondant à la durée moyenne des trains d'onde cohérents émis par la source, est supérieure à la différence de parcours des deux faisceaux référence et objet, alors ils interfèrent. La figure d'interférence ainsi obtenue contient une information supplémentaire par rapport à une simple photographie. En effet, l'objet a introduit un déphasage de l'onde objet qui contient l'information sur le relief de celui-ci. Le fait d'avoir un faisceau référence permet de conserver cette information sur le support photosensible.

Les supports d'enregistrement les plus utilisés en holographie sont les plaques ou les films sur lesquels des sels d'argent ont été déposés dans une émulsion d'une épaisseur de l'ordre de la dizaine de micromètres, exactement comme sur des pellicules photographiques. Actuellement, quelques entreprises fournissent des plaques et des films de très bonnes qualités. Après la réalisation de l'hologramme, qui consiste à exposer pendant un temps Δt l'objet et le support photosensible, un développement similaire à ces dernières (révélateur et fixateur ou blanchiment) permet d'obtenir l'holo-

gramme final. Il est important d'ajuster le temps Δt en fonction de la sensibilité de ce dernier, généralement compris entre quelques dizaines de $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ à quelques mW/cm^2 . On utilisera pour cela un puissance-mètre (mesure de la puissance lumineuse sur une surface donnée, à une longueur d'onde donnée) qui permettra de calculer directement le temps d'exposition, ou à défaut un simple luxmètre utilisé en photographie. Dans ce dernier cas, il sera alors nécessaire de faire quelques essais pour trouver la correspondance entre le bon temps d'exposition pour les conditions expérimentales : longueur d'onde du laser, densité de puissance du laser au niveau du support photosensible et sensibilité du support photosensible.



Fig. 1 : schéma de principe de réalisation d'un hologramme. L : source de lumière cohérente ; S : système optique permettant de diviser le faisceau en 2 et de les étaler pour qu'ils recouvrent l'objet O et le support photosensible P ; FR et FO : faisceaux référence et objet, respectivement ; θ : angle moyen entre FR et FO.

Choix d'un laser

L'holographie n'a pu vraiment se développer qu'avec l'invention du laser, dans les années 60. Ces sources de lumière ont maintenant des longueurs de cohérence qui peuvent dépasser le kilomètre dans certains cas. La possession d'un laser très onéreux a été pendant longtemps le premier obstacle à la réalisation d'hologramme en dehors des laboratoires de recherche. Avec la démocratisation des diodes laser à semi-conducteurs ces dernières années, ce n'est plus le cas aujourd'hui. Il est possible de trouver de petites diodes laser émettant dans le rouge permettant de réaliser de petits hologrammes. Le coût de ces diodes laser peut être inférieure à 50 euros, en comparaison du coût avoisinant les 1000 € pour le laser le plus utilisé en holographie : le laser à gaz HeNe. Le taux de réussite des hologrammes sera néanmoins diminué si la diode laser n'est pas stabilisée en température, car alors ses caractéristiques fluctuent fortement. Hélas, une telle stabilisation ramène le coût à celui d'un laser HeNe. Il est aussi possible de trouver de petits lasers émettant dans le vert (laser solides à cristaux émettant dans le proche infra-rouge, avec doublement de fréquence) avec des longueurs de cohérence convenables pour moins de 200 €. Le choix de la puissance du laser dépend bien sûr du type d'hologrammes qu'on veut réaliser. Cependant, une puissance de quelques mW permet de réaliser la plupart des montages classiques. Pour des raisons de sécurité, il ne faut pas que le faisceau collimaté dépasse 1 mW, ce qui correspond à 40 fois l'intensité du soleil si on pointait directement le faisceau dans l'œil d'une personne. L'utilisation d'un laser de quelques mW nécessite donc d'utiliser des lunettes d'alignement. L'usage

d'une diode laser non collimatée permet d'utiliser des puissances supérieures à 1 mW sans aucun risque, le faisceau étant naturellement divergent. Un laser nécessite un temps de chauffe pour que ses caractéristiques optiques soient stables, ce qui est indispensable pour réussir les hologrammes. Ce temps varie de quelques minutes pour une diode laser stabilisée, à une trentaine de minutes pour un laser HeNe. L'exposition du support photosensible au laser ne peut donc pas être fait en allumant le laser pendant un temps Δt . On préférera un obturateur électro-mécanique programmable (attention de choisir un modèle qui ne fasse pas de vibrations pendant sa commutation) ou simplement un obturateur placé devant le faisceau qu'on enlèvera manuellement pendant Δt . Dans ce dernier cas, il faudra bien sûr avoir des valeurs de Δt supérieures à la seconde pour être suffisamment précis (typiquement, une précision de $\pm 10\%$ sur Δt est nécessaire pour obtenir des résultats optimaux). La limite supérieure à Δt sera imposée par l'environnement et le montage choisis : plus Δt est long, plus il y a de risque d'avoir une vibration parasite qui fasse échouer l'expérience.

Problème des vibrations

La distance moyenne d entre les traits de la figure d'interférence que constitue un hologramme fait avec un laser de longueur d'onde λ peut s'écrire comme suit :

$$d = \frac{\lambda}{n \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (1)$$

n étant l'indice de réfraction du milieu photosensible et θ l'angle moyen entre les faisceaux référence et objet. Les valeurs de d sont en général inférieures au micromètre. Il est donc nécessaire d'avoir un support photosensible avec une très bonne résolution, bien au delà de celle des films photographiques. La taille moyenne des grains d'halogénure d'argent contenus dans une émulsion se situe entre 25 nanomètres et quelques nanomètres. Si des déplacements parasites de l'ordre de grandeur de d ont lieu pendant la réalisation de l'hologramme, la figure d'interférence sera détruite, et l'hologramme sera raté. On voit donc que la réalisation d'un hologramme nécessite un dispositif expérimental qui limite les vibrations parasites. On trouve donc, à juste titre, dans les livres spécialisés de nombreuses recommandations et mises en gardes contre l'absolue nécessité de disposer d'un environnement exempt de toute source de vibration. Mais il faut moduler ces précautions en fonction du dispositif choisi. Il est même possible de réaliser de petits hologrammes dans des conditions jugées « catastrophiques » par tout honnête holographiste. Un bon test qualitatif consistera à installer un petit interféromètre de Michelson sur le support où seront réalisés les hologrammes, et à visualiser la figure d'interférence résultante à quelques mètres : des sources de vibrations incontrôlées entraî-

neront des vibrations de cette figure. Il est aussi possible d'utiliser de petits capteurs comme ceux utilisés pour sonoriser des batteries en musique. Ils peuvent permettre de détecter des sources de vibration qui pourraient empêcher le bon déroulement de l'expérience.

Tout d'abord, il faudra en général travailler avec des plaques plutôt qu'avec des films pour limiter les vibrations du support où est réalisé l'hologramme. En effet, les films, généralement d'une épaisseur de quelques dixièmes de mm, sont évidemment beaucoup plus sensibles aux vibrations ambiantes qu'une plaque de verre de 3 mm d'épaisseur.

La seconde précaution consistera à s'équiper d'un système anti-vibratoire simple : un bac rempli de sable sur lequel on posera une succession de plaques massives, en alternance avec des plaques de polyuréthane (amortissement basses fréquences) et des chambres à air de vélo (amortissement hautes fréquences).

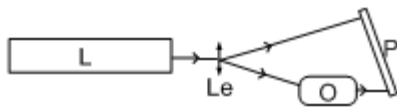


Fig. 2 : montage mono-faisceau par transmission (vue de dessus) composé d'un laser L dont le faisceau collimaté est rendu divergeant à l'aide d'une lentille Le. L'objet O doit être translucide. La partie du faisceau qui traverse l'objet est le faisceau objet alors que celle qui arrive directement sur la plaque P est le faisceau référence.

Enfin, il est important de noter que la stabilité du système est cruciale à partir du moment où le faisceau laser est divisé en faisceaux référence/objet. Si on veut limiter les problèmes de vibrations, il sera donc toujours très intéressant de choisir un montage qui divise le faisceau le plus près possible de la plaque où sera fait l'hologramme. Il faut noter qu'il n'est donc pas demandé d'avoir un niveau de stabilité très élevé au niveau du laser. Il est même possible de faire des montages pour réaliser des hologrammes avec un laser mobile. Les dispositifs nécessitant beaucoup d'optiques après avoir divisé le faisceau sont plus délicats à réaliser, car il faut alors avoir une bonne stabilité de tous ces éléments. Par contre, les montages « mono-faisceaux, » comme celui décrit par la suite, sont donc particulièrement intéressants. Dans ce type de dispositif, le faisceau est rendu divergeant à l'aide d'une optique (objectif de microscope, lentille, ...) et joue à la fois le rôle de faisceau référence et de faisceau objet. D'autre part, comme nous l'indique la relation (1), nous avons intérêt à avoir un angle θ le plus petit possible. La figure 2 présente un montage « mono-faisceau » très robuste. L'hologramme obtenu nécessite d'utiliser le laser qui l'a créé pour pouvoir l'observer à travers l'hologramme (hologramme par « transmission »). Il est né-

cessaire d'avoir un objet translucide et de fixer la plaque avec un support mécanique pour qu'elle soit bien stable. Ce type de montage ne nécessite pas de disposer d'un support anti-vibratoire du type de ceux décrits juste avant.

Il est encore possible d'améliorer la stabilité d'un montage mono-faisceau en utilisant la gravité comme système stabilisateur. Ce type d'hologrammes combine le principe des photographies couleur de Gabriel Lippmann et de l'holographie, et a été proposé par Yuri Denysiuk en 1962. Un de ses gros avantages est que l'hologramme peut être observé en lumière blanche (hologramme « par réflexion », car observé en regardant la source de lumière blanche se réfléchissant sur l'hologramme), pour peu qu'elle soit suffisamment ponctuelle, vue de l'hologramme. La figure 3 (vue de côté) montre un montage mono-faisceau avec une diode laser. La divergence intrinsèque du faisceau fait qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser une optique pour l'étaler. Le faisceau réfléchi par l'objet joue le rôle de faisceau objet qui rencontre le faisceau arrivant depuis le laser (faisceau référence). L'angle θ est alors de l'ordre de 180° , ce qui n'est pas très favorable puisque les traits de la figure d'interférence sont alors très rapprochés (relation (1)). Mais le système est très stable car le faisceau n'est divisé en deux qu'à partir de la plaque. La stabilité de l'objet par rapport à la plaque est assurée par le fait que l'objet est simplement posé sur la plaque. Ce dispositif très robuste permet de réaliser de petits hologrammes sur « un bout de table », sans aucune précaution particulière.

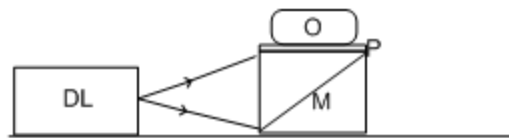


Fig. 3 : vue de côté d'un montage mono-faisceau avec une diode laser DL. Le miroir M est fixé à 45° pour renvoyer le faisceau vers la plaque P et l'objet O posés sur la structure supportant le miroir. Ce dispositif très robuste permet de réaliser de petits hologrammes sur « un bout de table ».

Une autre alternative moins stable mais encore plus simple consiste à utiliser le montage de la figure 3 sans le miroir à 45° : l'objet est simplement posé devant la diode laser, fixé avec un peu de pâte à modeler par exemple. La plaque est posée verticalement contre l'objet, pour limiter les vibrations entre elle et l'objet. C'est le montage le plus simple qu'on puisse concevoir.

Il est intéressant de noter que le montage choisi par Dennis Gabor pour son expérience historique de réalisation d'un hologramme en 1947 utilisait un montage avec un angle θ proche de zéro. Dans ce cas particulier, d devient beaucoup plus grand que sa valeur pour un montage holographique standard. Cela a deux conséquences : tout d'abord, on limite grandement les problèmes de vibration. D'autre part, Denis Gabor a

ainsi pu utiliser un support photosensible argentique de faible résolution.

Les deux montages présentés en figures 2 et 3 sont utilisés pour faire des démonstrations d'holographie aux classes de collèges et de lycées qui viennent rencontrer des chercheurs à l'Espace Culture de l'Université de Provence (ESCUP). En moins d'une heure, moi ou des étudiants en thèse réalisent un petit hologramme devant une demi-classe, avec l'aide ponctuelle de quelques uns des élèves. Le discours qui accompagne la réalisation est adapté au niveau de la classe (collège, lycée, grand public adulte) et présente à la fois des aspects historiques (dualité onde-corpuscule, qui a inventé l'holographie ?, ...), physiques (laser, lumière, couleurs, interférences, ...) et plus appliqués (les différents types d'images en 3D, les applications de l'holographie...). Le succès de cet atelier scientifique dont le sujet est pourtant hors-programme de l'enseignement secondaire, nous a poussé à proposer aux enseignants des journées de formation pour qu'ils puissent eux-mêmes transmettre ces connaissances à leurs élèves. Dans ce cadre, les enseignants apprennent les principes de l'holographie et réalisent quelques hologrammes eux-mêmes. Une « valise holographique » est en préparation et sera destinée aux enseignants qui auront fait cette formation. Ils pourront ainsi réaliser des hologrammes dans leurs établissements devant leurs élèves et présenter les principes physiques et les applications.

En plus de ces activités de diffusion scientifique, nous utilisons aussi le thème de l'holographie en projet de licence première année de physique. Une demi-journée par semaine pendant un semestre, un petit groupe d'étudiant réalise des expériences simples mettant en évidence quelques propriétés des lasers, et développent un projet autour d'un thème de l'holographie ou des lasers (rédaction d'un petit mémoire de vingt pages maximum et présentation orale complétés par une expérience). Ils ont ainsi l'occasion de réaliser des hologrammes et d'aborder de façon concrète des notions qui seront approfondies dans la suite de leurs cursus. Quelques exemples de thèmes choisis :

- Les mémoires de stockage holographiques (réalisation d'un hologramme mutli-exposition);
- Les principes de la photographie couleur Lippmann. Lien avec l'holographie;
- Réalisation d'un hologramme par transmission ou d'un hologramme 360°.

Enfin, des travaux-pratiques d'holographie sont proposés aux étudiants du master professionnel « Instrumentation, optique et laser ». A ce niveau, il s'agit plus d'un mini-projet sur une journée pendant laquelle les étudiants doivent remplir un cahier des charges sur un thème donné :

- réalisation d'un filtre passe bande étroit « notch », basé sur le principe d'un hologramme Denysiuk mono-faisceau;
- réalisation d'un réseau holographique : interférence de deux faisceaux lasers collimatés sur une plaque holographique;
- mesures de déformation d'une lame métallique par holographie double exposition.
- Mesure et comparaison de la longueur de cohérence de deux lasers pour l'holographie à l'aide d'un interféromètre Perot-Fabry équipé d'un déplacement d'une des faces par piezo.



Fig. 4 : 2 exemples d'hologrammes. Le premier a été fait lors d'un atelier avec un groupe de collégiens à l'ESCUP alors que le deuxième, un peu plus délicat à réussir, a été réalisé par un étudiant du projet holographie en licence 1^{ère} année.

En conclusion, lorsque j'ai commencé à m'intéresser à l'holographie, les livres que j'ai lus ont trop souvent insisté sur la quasi-impossibilité de réussir ce type d'expérience sans un matériel de recherche haut de gamme. J'ai donc présenté dans cet article comment il est possible de réaliser des hologrammes avec du matériel assez simple dans différents champs du savoir : enseignement en licence fondamentale, en master professionnel, diffusion scientifique et formation continue. Une démonstration de réalisation d'hologrammes complètera ce texte lors de la conférence.

Remerciements

Je tiens à remercier Yves Gentet, artiste holographiste de premier plan, pour nos nombreuses discussions qui m'ont fait profiter de sa grande expérience en holographie.

Bibliographie

- [1] G. Lippmann, comptes rendus à l'académie des Sciences vol. 112 (1891), pp. 274.
- [2] D. Gabor, Proc. Royal Society A, p, 197, vol. 454 (1949).