



HAL
open science

L'holographie, une reconstruction par la lumière grâce à un matériau photostructurable

Christiane Carré, Yvon Renotte, Paul Smigielski, Xavier Allonas, Christian Ley, Safi Jradi

► **To cite this version:**

Christiane Carré, Yvon Renotte, Paul Smigielski, Xavier Allonas, Christian Ley, et al.. L'holographie, une reconstruction par la lumière grâce à un matériau photostructurable. L'Actualité Chimique, 2015, La chimie fête la lumière, 397-398, pp.102-107. hal-01578822

HAL Id: hal-01578822

<https://hal.science/hal-01578822>

Submitted on 29 Aug 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'holographie, une reconstruction par la lumière grâce à un matériau photostructurable

Christiane Carré, Yvon Renotte, Paul Smigielski, Xavier Allonas,

Christian Ley et Safi Jradi

Résumé Lors de l'enregistrement d'un hologramme, toutes les informations contenues dans la figure d'interférences produite par superposition d'une onde de référence à celle issue de l'objet sont mémorisées par le support photosensible sous forme d'une modulation de l'indice de réfraction et/ou d'un relief en surface. Les émulsions argentiques furent le premier système mis en jeu. Les photopolymères, structurables par la lumière à l'échelle sub-microscopique, sont aussi d'excellents candidats. Depuis, tous les travaux d'optimisation correspondants ont généré diverses applications, telles que la fabrication de composants optiques diffractifs ou l'utilisation d'hologrammes embossés pour la protection des documents ou des objets envers la contrefaçon.

Mots-clés **Holographie, matériaux pour l'enregistrement holographique, gélatine, photoresists, photopolymères.**

Abstract **Holography, reconstructing by light thanks to a photostructurable medium.** During holographic recording, interference patterns produced by a reference beam and the light waves scattered by the object are stored by building-up of refractive index variations or relief profiles in the photosensitive medium. Early holograms used silver halide photographic emulsions as the recording medium. Being able to memorize an incident complex fringe pattern with small features at the sub-micrometer scale, different polymeric media are also successfully usable. All this optimizing work generated different applications concerning for example creation of diffractive optical elements or development of anti-counterfeiting solutions through embossed holograms.

Keywords **Holography, holographic recording materials, gelatine, photoresists, photopolymers.**

Référence de l'article :

C. CARRÉ, Y. RENOTTE, P. SMIGIELSKI, X. ALLONAS, C. LEY, S. JRADI, "L'holographie, une reconstruction par la lumière grâce à un matériau photostructurable", L'Actualité Chimique, 397-398, 102-107 (2015).

L'optimisation et la caractérisation du point de vue chimique des matériaux d'enregistrement holographique a été et est toujours l'objet de nombreuses publications scientifiques, mais principalement dans des revues du monde de l'optique et de la photonique. Ces travaux, qui nécessitent une parfaite connaissance des processus d'interférométrie et de diffraction, ont surtout été menés par les utilisateurs de ces milieux photosensibles. Lorsque les franges d'interférences sont mémorisées, les paramètres liés à la composition et à la structure de l'émulsion évoluent simultanément dans le temps et dans l'espace à l'échelle de la centaine de nanomètres. Compte tenu de la complexité du problème, des compromis doivent être définis pour résoudre les équations mathématiques et simuler l'évolution spatio-temporelle du système, ce qui est toujours d'actualité et suscite des points de vue divergents. Le physicien ne prend pas directement en compte les données cinétiques caractéristiques des différentes étapes du mécanisme réactionnel photoinduit, mais travaille sur le rendement de diffraction de l'hologramme en cours de réalisation, en introduisant un ou plusieurs paramètres qui ne sont ensuite reliés que de façon qualitative aux constantes cinétiques.

Indépendamment de ces avancées, chaque individu peut toujours se poser des questions : mais qu'est-ce qu'un hologramme ? Comment est-il créé ? Pourquoi peut-il générer des images où le relief de l'objet est fidèlement reproduit, contrairement à une photographie ? C'est à ces questions, qui n'ont pas encore été abordées dans l'Actualité Chimique, que nous proposons de répondre, tout en considérant les propriétés physico-chimiques des principales classes de matériaux aujourd'hui disponibles pour l'enregistrement holographique. En conclusion, seront présentées les applications qui en découlent.

Certains de ces systèmes sont proposés par des laboratoires de recherche et sont décrits dans la littérature scientifique. D'autres commercialement disponibles sont accessibles à chacun, sauf s'il y a des accords de confidentialité à signer. Cela signifie que, pour en disposer, l'utilisateur doit répondre positivement aux critères imposés par la société et qu'il n'est pas le seul propriétaire des résultats.

L'holographie

Hologrammes? Ce mot est facilement évocateur, puisque certains de ces objets sont présents sur nos cartes bancaires, les billets de banque ou nos papiers d'identité, mais leur réalisation n'est pas intuitive. La façon, dont l'information est codée dans le support d'enregistrement holographique, est différente de celle utilisée en photographie. L'holographie, par transmission ou par réflexion, est une technique interférentielle permettant de stocker simultanément l'amplitude et la phase d'une onde lumineuse. Le principe en a été découvert en 1948 par Dennis Gabor, prix Nobel de physique en 1971. C'est en 1960, suite à l'invention par Theodore Maiman du laser et de sa lumière cohérente, que les américains Emmeth Leith, Juris Upatnieks et le russe Yuri Denisyuk ont appliqué le principe de Dennis Gabor, pour réaliser les premiers hologrammes [1]. Cette avancée donna lieu au développement d'applications dans l'industrie lorsque les lasers furent commercialement disponibles [2].

Pour réaliser un hologramme [3-4], deux faisceaux émis par une même source laser sont utilisés (*figure 1*). L'onde objet, après avoir éclairé l'objet à holographier, est diffusée, réfléchiée ou diffractée, puis se superpose à l'onde de référence. Un réseau de franges d'interférences est ainsi généré, là où est placé le matériau holographique. Ce dernier doit alors physiquement ou chimiquement mémoriser ces franges. Cela permet de stocker les informations de phase relative à l'objet (donc son relief) et contenues dans la figure lumineuse incidente sous forme de variations d'éclairement. Après exposition et développement si nécessaire, l'hologramme diffracte une onde exactement semblable à celle issue de l'objet au moment de son enregistrement et dans la même direction (*figure 2*). La localisation dans l'espace, la forme et les couleurs de l'objet sont alors conservées dans le volume de l'émulsion sous forme d'un réseau de franges qui correspondent à un pas variant de quelques centaines de nanomètres à la

dizaine de micromètres. Pour l'observateur, tout se passe comme si l'objet est toujours présent (*figures 3 et 4*).

Les supports d'enregistrement holographiques

Le matériau idéal, outil pratique et parfait, n'existe pas. Un compromis doit être défini en fonction de l'application considérée et des supports holographiques existants, sachant qu'ils diffèrent les uns des autres aussi bien du point de vue optique que du mode d'utilisation [1, 4]. Les propriétés devant être prises en compte sont notamment les suivantes :

- la sensibilité spectrale qui définit le ou les lasers adaptés ;
- la sensibilité énergétique qui détermine le temps de pose, les éclaircissements incidents nécessaires pour créer un hologramme ayant un certain rendement de diffraction ;
- le seuil d'exposition qui correspond à la limite énergétique inférieure requise pour inscrire une information durablement dans le matériau ;
- la résolution spatiale qui correspond à l'inverse de la taille du plus petit détail enregistrable. Elle doit être élevée, le système devant enregistrer des informations de taille inférieure au quart de la longueur d'onde utilisée (400 nm pour le violet), condition imposée par le codage interférométrique (donc jusqu'à 10000 mm^{-1}) ;
- sa fonction de transfert linéaire sur une plage de fréquences spatiales aussi large que possible.

De plus, certains matériaux sont effaçables et recyclables, d'autres non. Une étape de post-développement peut être nécessaire. Dans ce cas, il est nécessaire que le film photosensible soit le plus stable possible en volume et ne subisse ni contraction, ni dilatation, pour ne pas déformer les informations stockées.

Matériaux photosensibles commercialement disponibles aujourd'hui

Emulsions argentiques

Les émulsions argentiques sont constituées d'un substrat (verre ou matière plastique inerte) recouvert de gélatine (épaisseur de 5 à 10 μm) contenant des cristaux d'halogénures d'argent en suspension (AgBr et AgCl). Le système chimique pour les émulsions holographiques est le même que celui utilisé en photographie argentique, sauf que l'optimisation de la composition est différente, afin d'augmenter la résolution spatiale du matériau liée à la taille des cristaux (4 nm (par ex. [5]) à 50 nm) et d'enregistrer plusieurs franges espacées de quelques centaines de nm seulement. A la différence également de la photographie, les couleurs de l'hologramme développé et restitué en lumière blanche ne proviennent pas de colorants, mais seulement de l'espacement de ces franges argentiques. Sous l'action de la lumière, il se forme dans l'halogénure d'argent autant de paires d'électrons et de lacunes d'électrons, appelées 'trous', que de photons absorbés. Les électrons réagissent avec les ions Ag^+ en donnant des atomes d'argent. La gélatine qui enrobe les cristaux ne se borne pas au simple rôle de support et séparateur des cristaux. Elle préserve en partie le travail des photons en réagissant avec les trous qui l'atteignent en migrant vers la surface des cristaux et en empêchant ceux-ci de reprendre l'électron cédé à l'ion Ag^+ (mais l'autre partie des trous à l'intérieur du cristal se recombine avec autant d'électrons, ce qui diminue d'autant le rendement). Les atomes d'argent ainsi formés sont groupés en agrégats. Selon l'éclaircissement local, les cristaux reçoivent plus ou moins de photons et les agrégats contiennent donc plus ou moins d'atomes d'argent (de 0 à environ 10), ce qui constitue l'image latente, trop peu intense pour être visible par l'œil. Le processus est ensuite considérablement amplifié par le développement réalisé en milieu réducteur par voie humide qui réduit complètement en argent métallique les cristaux contenant un agrégat de nombre minimum d'atomes [6-7]. L'image est ensuite fixée par élimination des halogénures d'argent non réduits.

En holographie argentique, c'est un hologramme d'amplitude qui est réalisé (l'hologramme module l'amplitude du faisceau de lecture : les zones sombres, c'est-à-dire qui ont été noircies par la réaction photochimique, ne laissent pas passer la lumière, contrairement aux zones claires qui n'ont pas reçues de photons). Il peut être ensuite transformé en un hologramme de phase par blanchiment (traitement chimique permettant de rendre l'hologramme transparent et de créer une modulation d'épaisseur et d'indice de réfraction au lieu des variations locales de transmission).

Même si ce fut le matériau historique utilisé pour l'enregistrement des premiers hologrammes d'objets tridimensionnels, l'holographie argentique, qui représentait pour les grandes sociétés telles que Agfa-Gevaert, Eastman-Kodak, Fuji-Films, Ilford... des enjeux commerciaux modestes en comparaison de la photographie, a subi le contrecoup de l'abandon progressif de la fabrication de masse des émulsions argentiques pour la photographie devant l'essor de la photographie numérique. Néanmoins, les recherches poursuivies dans des laboratoires académiques ou de petites sociétés ont conduit à des progrès remarquables sur la sensibilité [5-7]. Ces avancées ont permis de réduire la taille des cristaux de AgBr jusqu'à 4 nm et ainsi de supprimer les effets de diffraction des grains qui rendaient les hologrammes troubles en vision à grand angle. Parallèlement, l'énergie nécessaire pour produire l'image latente, donc la puissance du laser et la durée d'exposition, ont pu être largement réduits, ce qui permet d'holographier aujourd'hui des objets aussi fragiles que des ailes de papillon [5]. Par ailleurs, l'emploi de trois lasers simultanés, bleu, vert et rouge, bien adaptés en longueur d'onde à la vision humaine, permet de reconstruire des images en 3D en restituant toutes les couleurs, tout en bénéficiant de l'excellente sensibilité de ce type d'émulsions (100 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ par couleur). Ces techniques sont surtout applicables par des amateurs experts, par exemple pour la création d'hologrammes artistiques d'extrême résolution. Mais cela requiert des instruments comme les lasers et un savoir-faire qui dépasse de beaucoup la pratique photographique courante, si bien que le marché en est limité. Aujourd'hui, seulement quelques petites sociétés, telles que Ultimate Holography en France [5], parviennent à distribuer des émulsions argentiques pour ce type d'enregistrement holographique.

Gélatine bichromatée (DCG)

Ce matériau d'enregistrement holographique est constitué de gélatine et de bichromate d'ammonium. Son étude peut être effectuée en considérant la gélatine comme une chaîne peptidique comportant des groupements hydroxyles, carboxyliques et aminos [8]. Simultanément, d'autres matrices hôtes du bichromate d'ammonium (ou de potassium) ont été mises en œuvre, pour élucider le mécanisme réactionnel mis en jeu lors de l'exposition. Il s'agit de l'alcool polyvinylique (présence uniquement de groupements OH) et de l'acide polyacrylique (groupements COOH). Les comparaisons ont montrées des comportements holographiques différents d'une matrice à l'autre. Dans chaque cas, il est établi que, sous irradiation, le chrome VI est d'abord réduit à l'état de chrome V par transfert d'électron depuis la matrice polymère. Cette espèce a en particulier été mise en évidence et quantifiée par résonance paramagnétique électronique [8]. Elle joue un rôle clé dans le processus de croissance des hologrammes et sa stabilité est fonction de la nature chimique de la matrice hôte. Ensuite, le chrome V se transforme plus ou moins rapidement en chrome III. Simultanément, la matrice hôte subit des modifications de structure chimique (transformation en particulier des fonctions alcool en fonctions cétone) et de réticulation par formation de complexes entre les entités chrome V et III avec les chaînes peptidiques.

Après enregistrement de l'hologramme, l'émulsion doit subir un post-traitement en milieu aqueux, qui génère dans l'émulsion une modulation d'indice de réfraction pouvant être supérieure à 0,1 et conduire à une efficacité de diffraction allant jusqu'à 99%. Historiquement difficile à produire de manière reproductible en raison de sa réactivité à l'humidité, quelques

firmes (Slavitch, uab Geola Digital en Lituanie) ont réussi à maîtriser le produit et offrent des plaques et films pré-sensibilisés. En Allemagne, Holotec GmbH produit des hologrammes avec ce type de matériau.

Photoresists

Il s'agit ici de produits industriels commerciaux, certains proposés dès les années 70 et bien maîtrisés en raison du rôle essentiel qu'ils ont joué dans l'industrie électronique, domaine où ils sont utilisés pour produire des cartes de circuits imprimés. La lumière induit dans ce matériau une modification de structure qui le rend soit soluble (positif), soit insoluble (négatif) dans un développeur adéquat. Ainsi lors d'un enregistrement holographique pour une résine positive, les zones ayant reçues des photons sont dissoutes contrairement aux zones sombres, ce qui permet de mémoriser en relief à l'échelle microscopique les franges d'interférences.

Par exemple, la résine Novolaque (polymère issu de la réaction d'un phénol avec le formaldéhyde) est ici associée à la diazonaphtoquinone (DNQ), composé capable d'inhiber la dissolution du polymère [9]. Les films de Novolaque sont facilement dissous en milieu aqueux basique. Les groupements phénols sont transformés en ions phénolates, ce qui permet de solubiliser les chaînes polymères. En présence de DNQ, la vitesse de dissolution décroît de façon drastique, car il y a alors polarisation des groupements OH des phénols et formation de liaisons hydrogène, ce qui protège les extrémités phénols et diminue l'acidité de la résine. En revanche après exposition, la DNQ favorise la dissolution. Les photons incidents induisent, au niveau de la DNQ, une réaction exothermique (réarrangement de Wolff). Il n'y plus de protection des phénols. Suite à l'augmentation locale de la température, le polymère est plus rapidement dissous dans les zones claires de la figure d'interférences [9].

Ce matériau, qui a une résolution suffisante pour enregistrer des motifs à haute fréquence spatiale, est impropre par nature à l'enregistrement d'hologrammes par réflexion. En revanche, il génère dans les montages par transmission des hologrammes en relief de surface. Ceux-ci peuvent ensuite être recouverts d'une couche de nickel par électrolyse, afin de réaliser un moule métallique plus résistant que le photoresist. Ce moule, copie négative conforme de l'hologramme, est utilisé en seconde étape comme matrice pour la reproduction à chaud, par estampillage dans un matériau plastique [10]. C'est ainsi que sont produits en grand nombre les hologrammes 'embossés' (ou estampillés), qui sont par conséquent des hologrammes de transmission. Mais si ces derniers sont métallisés à l'arrière, généralement par dépôt d'un revêtement d'aluminium, ils sont alors utilisables en réflexion (*figure 5*).

Du point de vue commercial, doit ici être citée la série des photorésines MICROPOSIT™ S1800™ G2 provenant du fabricant "Rohm and Haas Electronic Materials" (anciennement connue sous la marque "SHIPLEY™" et en particulier le photoresist positif Shipley AZ-1350 souvent utilisé en holographie).

Photopolymères

Divers photopolymères présentent des propriétés spécifiques intéressantes pour l'holographie, qui sont fondées sur la possibilité de structurer à des échelles microscopiques, voire nanoscopiques, leurs propriétés optiques linéaires et non linéaires. Ces matériaux sont constitués d'un système photosensible associé :

- à un ou plusieurs monomères qui jouent simultanément le rôle de matrice ou qui sont dissous dans un polymère,
- ou à un polymère tel que le poly(méthacrylate de méthyle) ou le poly(N-vinylcarbazole), le photosensibilisateur pouvant être directement greffé sur la chaîne.

Lors de l'enregistrement de l'hologramme, ils subissent une réaction de polymérisation, de réticulation ou de dégradation des chaînes polymères qui est inhomogène et peut donner lieu à

des phénomènes de transport de matière ou de contraction de volume. C'est l'ensemble de ces processus couplés les uns aux autres qui engendre la formation de variations locales d'indice de réfraction ou d'épaisseur dans le milieu réactionnel.

En particulier, lorsqu'une figure d'interférences éclaire une résine photopolymérisable, la réaction de polymérisation photoinduite est spatialement inhomogène. Ceci se traduit à l'échelle microscopique par l'apparition de gradients de concentration, donnant naissance à des processus de diffusion entre les zones de faible intensité incidente et celles de forte intensité. Il y a alors construction dans l'émulsion d'une architecture tridimensionnelle rigide présentant une répartition inhomogène de la matière. Le couplage entre réaction chimique et transport de matière se traduit par la création dans le milieu d'une modulation de son indice de réfraction et/ou d'un relief à la surface du matériau généré *in situ* dans le milieu ou qui apparaît après lavage de l'échantillon, les zones non polymérisées étant les seules solubles [11].

Différents exemples à base d'acrylates multifonctionnels, d'acrylamides... sont aujourd'hui proposés [12]. Simples d'emploi et flexibles, ces matériaux donnent naissance *in situ* à des hologrammes de phase épais et permanents (*figure 6*). Le principal intérêt est qu'il n'est pas nécessaire de transformer l'image latente en image fixe. En particulier, les systèmes d'enregistrement holographique photopolymérisables mis en œuvre en collaboration entre le LPIM et Foton correspondent à un système photosensibilisateur à trois composants : un colorant et deux co-amorceurs (un donneur d'électron et un accepteur d'électron). Le Rose Bengal et la Safranine O sont par exemple associés à la 2,2'-Bis(2-chlorophényl)-4,4',5,5'-tétraphényl-1,2'-biimidazole et la N-phénylglycine, dans un mélange de monomères à base d'Ebecryl 1290 (acrylate hexafonctionnel), du 1,1,1,3,3,3-hexafluoroisopropyl acrylate et de vinyl néononanoate [12]. L'intérêt repose ici sur la vitesse de la réaction de polymérisation amorcée par ces photoamorceurs qui est plus élevée que celle des systèmes à deux composants. Simultanément, les taux de conversion finaux monomères/polymères sont plus élevés. Les deux co-amorceurs interagissant avec le colorant, chacun donne naissance à des espèces radicalaires capables d'amorcer la réaction de polymérisation lors de l'enregistrement de l'hologramme. Ainsi, il y a apparition de plus de radicaux pour un système 3-composants, par conséquent à un plus grand nombre de chaînes polymères, ce qui augmente le rendement de la réaction de polymérisation et sa vitesse. Le système optimal engendre un réseau créé en moins d'une vingtaine de secondes pour un éclairage de 25 mW/cm², son rendement de diffraction corrigé étant supérieur à 90% à la fin de l'enregistrement. Lorsque les systèmes considérés ne présentent pas la meilleure efficacité de diffraction à l'ordre 1, une optimisation des paramètres d'enregistrement holographique est nécessaire et il est toujours possible d'obtenir des résultats au moins supérieurs à ceux des systèmes à deux composants.

Afin d'augmenter la modulation d'indice de réfraction et simultanément d'induire de nouvelles propriétés, ces systèmes photopolymérisables pour l'holographie peuvent être dopés par des nanoparticules (ZnO, TiO₂...). Celles-ci ont tendance à se regrouper dans les zones sombres de la figure d'interférences, car elles sont moins solubles dans le polymère que les monomères. Sont aussi utilisables des cristaux liquides. Dans ce cas, le matériau, appelé holo-PDLC (Holographic Polymer Dispersed Liquid Crystals), possède simultanément les avantages d'un photopolymère (matériau auto-développant) et les propriétés d'un cristal liquide, ce qui lui confère des possibilités de commutation. Lors d'un enregistrement holographique correspondant à une réaction de polymérisation amorcée de façon inhomogène, il y a migration des molécules de cristal liquide vers les zones sombres correspondant au plus faible taux de polymérisation pour des raisons de solubilité, puis regroupement de ces molécules sous forme de gouttelettes. Cela engendre une structure stratifiée sous forme de domaines riches et pauvres en cristal liquide [13]. Par introduction de 30 % en masse de cristal liquide nématique BL036 (Merck Ltd) dans le précédent mélange de monomères en présence du Rose Bengal et de N-phénylglycine, il est possible d'enregistrer des réseaux holographiques ayant un rendement de

diffraction de plus de 80% en absence de champ électrique appliqué. Dans ce cas, l'indice de réfraction du polymère est de 1,53. Pour le cristal liquide, les indices de réfraction ordinaire et extraordinaire sont respectivement $n_0 = 1,527$ et $n_e = 1,794$ (valeurs données à 589 nm et 20°C, Merck Ltd). La composition du mélange photopolymérisable correspond volontairement à un indice du polymère égal à l'indice ordinaire du cristal liquide, afin de pouvoir provisoirement effacer l'hologramme. En présence d'un champ (ceci est possible grâce à la couche d'ITO déposée sur chaque substrat de verre), les molécules de cristal liquide s'orientent suivant leur axe optique et l'onde incidente ne voit plus de différence entre le polymère et le cristal liquide : l'hologramme est effacé.

Des supports d'enregistrement holographique photopolymérisables sont proposés par différentes sociétés, telles que DuPont, Bayer ou DAI Nippon, et destinés à des hologrammes dits de sécurité contre la contrefaçon (pour les banques, la production de luxe...), mais sous accord de confidentialité. Quant à la société Lynx au Brésil [14], elle commercialise un film photopolymère destiné à l'enregistrement holographique et utilisable pour l'enregistrement d'hologrammes en couleur (Polygrama Darol Photopolymer).

Applications

Même si l'essor de l'holographie n'a pas été celui initialement prévu à la fin des années 80, les applications de tous ces travaux destinés à l'optimisation de matériaux pour l'enregistrement holographiques se situent aujourd'hui dans différents domaines:

- tout aussi bien dans le domaine artistique que de l'imagerie. L'holographie image, connue du grand public par son côté spectaculaire (relief intégral saisissant des hologrammes géants), est présente aujourd'hui dans des musées, sur des panneaux pour la publicité, mais aussi pour la réalisation de maquettes holographiques d'architecture et autres... ;
- au niveau des systèmes anti-contrefaçon. Une application directe de l'holographie image est l'hologramme embossé utilisé sur les cartes bancaires, les cartes grises, les billets de banque, parfois les objets de luxe, le but étant de rendre le document infalsifiable. C'est aujourd'hui l'une des solutions proposées par la société Hologram Industries [15] ;
- pour la réalisation d'éléments optiques diffractifs (EOD). Un EOD est un dispositif capable de modifier par diffraction la distribution spatiale d'un faisceau lumineux. La lumière diffractée par l'élément forme des fronts d'ondes qui interfèrent et se recombinent pour donner naissance à la répartition lumineuse souhaitée. Les motifs constituant le relief sont calculés à partir des caractéristiques de l'onde incidente et de la figure de diffraction souhaitée à la sortie de l'EOD [16-17]. Ces composants trouvent de larges applications dans la spectroscopie (réseaux holographiques), la mise en forme de faisceaux lasers, pour le micro-usinage, la micro-soudure ou le micro-marquage. Leur utilisation est une solution élégante pour limiter au maximum les pertes de lumière, résoudre les problèmes d'aberrations optiques ou diminuer l'encombrement stérique d'un montage ;
- en interférométrie qui est une technique toujours utilisée dans l'industrie automobile ou aéronautique [3,18]. En particulier, l'interférométrie différentielle de speckle ou la shearographie consiste à utiliser un élément de cisaillement pour dédoubler le faisceau rétrodiffusé par l'objet, puis à faire interférer les deux composantes spatialement séparées et décalées. Pour effectuer ce cisaillement, il est possible de travailler en séparant les états de polarisation TE et TM des deux faisceaux avec une lame biréfringente de Savart [19]. En particulier, ces expériences mettent en jeu des hologrammes à polarisation circulaire, sous forme de vortex multiples, qui sont enregistrés dans un matériau composite photopolymère/cristal liquide.

Références

1. Hariharan P., Optical Holography, Principles, Techniques and Applications, *Cambridge University Press*, Cambridge, **1984**.
2. Conraud A., Holographie, l'image 3D, 1964-2004, éd. Conraud A. **2004**.
3. Smigielski P., Holographie industrielle, *Teknéa éd.*, Toulouse, **1994**.
4. Bjelkhagen H., Brotherton-Ratcliffe D., Ultra-realistic imaging: advanced techniques in analogue and digital colour holography, *CRC Press*, Londres, **2013** (ISBN: 978-1-4398-2799-4).
5. www.ultimate-holography.com
6. Belloni J., Mostafavi M., Les agrégats, précurseurs des nanoparticules, *L'Act. Chim.*, **2011**, 348-349, p. 13.
7. Belloni J., Treguer M., Remita H., De Keyzer R., Enhanced yield of photoinduced electrons in doped silver halide crystals, *Nature*, **1999**, 402, p. 865.
8. Bolte M., Israeli Y., Djouani F., Rivaton A., Frezet L., Lessard R.A., Hologram formation reconsidered in dichromated polyvinylalcohol : polymer cross-linking around chromium (V), *Proc. of SPIE (Practical Holography XIX: Materials and Applications)*, **2005**, 5742, p. 195-204.
9. Reiser A., Huang J.P., He X., Yeh T.F., Jha S., Shih H.Y., Kim M.S., Han Y.K., Yan K., The molecular mechanism of novolak–diazonaphthoquinone resists, *European Polymer Journal*, **2002**, 38, p. 619–629.
10. Saxby G., Manual of practical Holography, *Focal Press*, **1991**, p. 163.
11. Guo J., Gleeson M.R., Sheridan J.T., A review of the optimization of photopolymer materials for holographic data storage, *Physics Research International*, **2012**, ID 803439 (16 pp).
12. Ibrahim A., Ley C., Allonas X., Carré C., Pillin I., Tailoring 3-component photoinitiating systems for use as efficient photopolymerizable holographic material, *J. Display Technol.*, **2014**, 10, p. 456-463.
13. Carré C., Chevallier R., Mailhot B., Rivaton A., Understanding microstructure development in holographic polymer-dispersed liquid crystals, In *Basics and applications of photopolymerization reactions*, Fouassier J. P., Allonas X., Eds.; *Research Signpost*, Trivandrum, India, **2010**, vol. 3, p. 175.
14. www.lynx-us.com et <http://www.polygrama.com>
15. <http://www.hologram-industries.com/fr>
16. Kessels M. V., El Bouz M., Pagan R., Heggarty K., Versatile stepper based maskless microlithography using a liquid crystal display for direct write of binary and multilevel microstructures, *J. Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, **2007**, 6, p. 33002.
17. Chan Yong A., Heggarty K., Carré C., Battarel D., Rapid prototyping of diffractive optical elements in microstructured sol-gel hybrid material, *Proc. 2nd EOS Conf. Manufacturing of Optical Components*, **2011**, paper 4376.
18. Smigielski P., Holographie optique - Interférométrie holographique, *Techniques de l'Ingénieur*, **2001**, R 6330, p. 1-28.
19. Blain P., Michel F., Piron P., Renotte Y., Habraken S., Combining shearography and interferometric fringe projection in a single device for complete control of industrial applications, *Optical Engineering*, **2013**, 52, 0841021-7.



C. Carré



P. Smigielski



Y. Renotte



X. Allonas



C. Ley



S. Jradi

Christiane Carré est Chargée de recherche CNRS au Laboratoire FOTON (UMR FOTON, CNRS, Université de Rennes 1), ENSSAT.⁽¹⁾

Paul Smigielski est Professeur Ingénieur, Président du club CMOI/SFO, Mulhouse.⁽²⁾

Yvon Renotte est Professeur honoraire, consultant au HOLOLAB de l'Université de Liège-Belgique.⁽³⁾

Xavier Allonas et **Christian Ley** sont Professeurs au Laboratoire de Photochimie et d'Ingénierie Macromoléculaires, Université de Haute Alsace, Mulhouse.⁽⁴⁾

Safi Jradi est Maître de conférences au Laboratoire de Nanotechnologie et d'Instrumentation Optique, Université de Technologie de Troyes.⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Laboratoire FOTON, UMR FOTON, CNRS, Université de Rennes 1, ENSSAT, 6 rue de Kerampont, CS 80518, F 22305 Lannion, France. Courriel : christiane.carre@univ-ubs.fr

⁽²⁾ Club CMOI (<http://www.club-cmoi.com/>), 4 Bd Président Roosevelt, F 68200 Mulhouse, France. Courriel : club-cmoi@wanadoo.fr

⁽³⁾ HOLOLAB, Dept AGO, Université de Liège, B5a - Sart Tilman, B 4000 Liège, Belgique. Courriel : y.renotte@ulg.ac.be

⁽⁴⁾ Laboratoire de Photochimie et d'Ingénierie Macromoléculaires, Université de Haute Alsace, 3b rue Alfred Werner, F 68093 Mulhouse, France. Courriels : christian.ley@uha.fr et xavier.allonas@uha.fr

⁽⁵⁾ Laboratoire de Nanotechnologie et d'Instrumentation Optique, Institut Charles Delaunay - UMR CNRS 6281, LNIO et STMR, Université de Technologie de Troyes, 12 rue Marie Curie - CS 42060, F 10004 Troyes Cedex, France. Courriel : safi.jradi@utt.fr

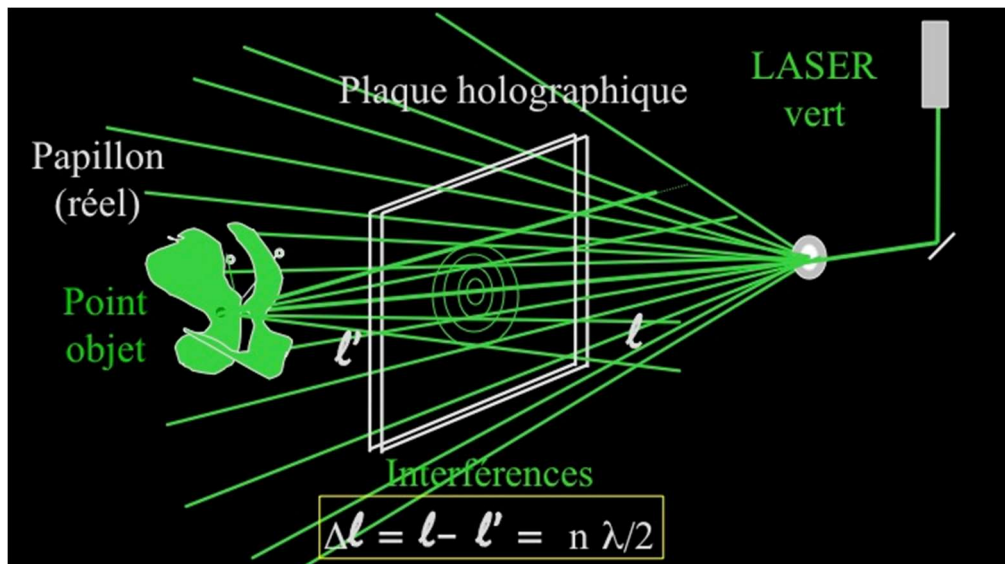


Figure 1 - Enregistrement d'un hologramme par réflexion. L'enregistrement est effectué grâce à deux faisceaux cohérents issus d'un même laser. La superposition de ces deux ondes, référence et objet, permet, par soustraction ou addition des phases des deux ondes, de créer un réseau d'interférences dépendantes de la distance de chaque point de l'objet au plan de la couche holographique sensible, et ainsi de coder toutes les informations de forme et de taille de l'objet et de l'intensité de lumière réfléchi. Si trois lasers, bleu, vert et rouge, éclairent l'objet simultanément, l'hologramme enregistre l'ensemble des couleurs sous forme de trois réseaux d'interférences. La distance entre deux franges de ce réseau (très grossi ici) n'est que de quelques centaines de nm (d'après J. Belloni).

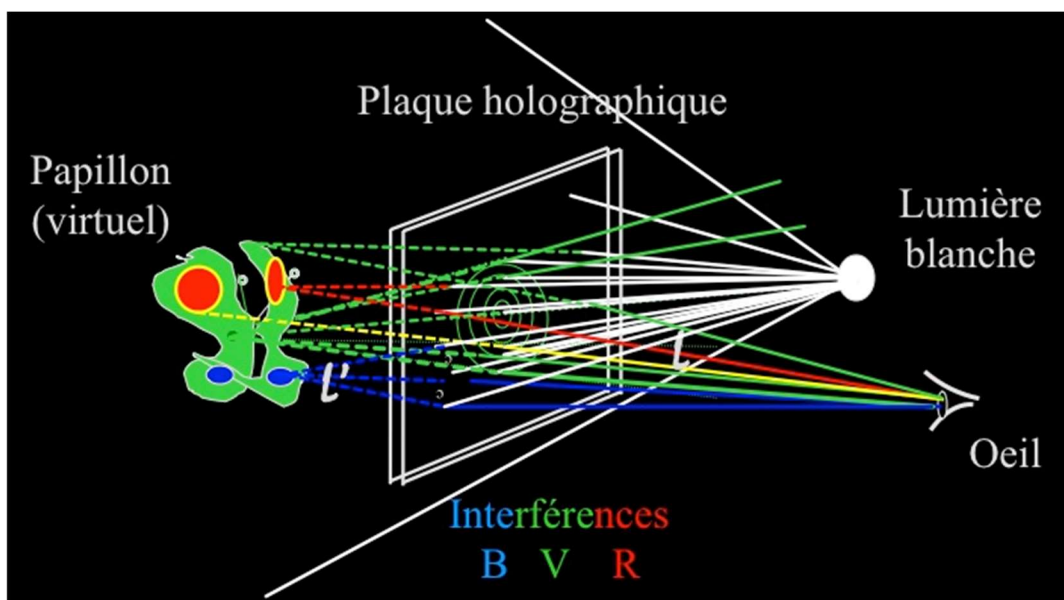


Figure 2 - Restitution de l'image holographique. Les franges d'interférence du réseau trichrome de l'hologramme, éclairées en lumière blanche, reconstituent pour l'observateur une image virtuelle en couleurs et en 3D de l'objet à la même échelle. Toutes les nuances de couleur sont restituées par une réflexion pondérée des faisceaux bleu, vert et rouge (d'après J. Belloni).



Figure 3 – Exemple d’hologramme monochrome: restitution de l’image holographique et objet correspondant. Enregistrement effectué à l’ENSSAT à Lannion, en transmission à 633 nm. Le support photosensible est ici une émulsion argentique commercialisée par la société Ultimate Holography (plaque U08 70). (Photo réalisée par Yoann Atlas, élève ingénieur optronique de l’ENSSAT, et Laurent Feichter).



Figure 4 - Hologramme couleurs d’une boîte de papillons (*Ornithoptera paradisea*), enregistré dans une émulsion argentique et restitué en lumière blanche. L’observateur a l’illusion d’avoir devant lui la boîte-objet, alors qu’il s’agit d’une image holographique. (Par courtoisie d’Y. Gentet [5]).



Figure 5 – Collection d'hologrammes créés par estampillage, l'hologramme maître étant enregistré dans un photoresist. Ils sont utilisés à des fins publicitaires, en tant que systèmes anti-contrefaçon ou permettent d'introduire des illustrations en 3 dimensions dans les magazines (Collection C. Carré).

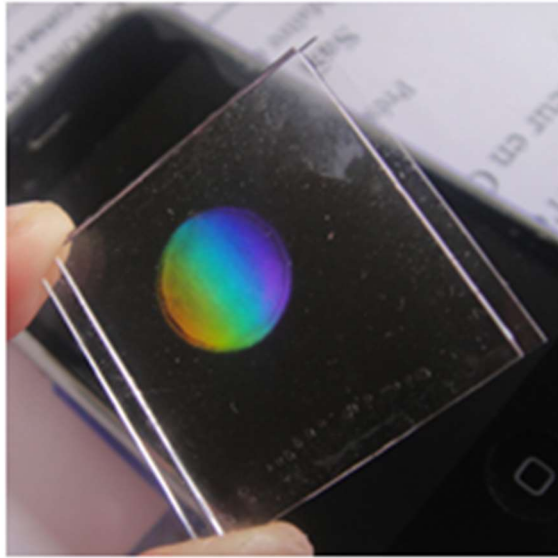


Figure 6 - Diffraction de la lumière blanche par un réseau holographique enregistré par transmission dans un matériau photopolymérisable à base d'acrylates, pris en sandwich entre deux substrats de verre (épaisseur du film $\sim 18 \mu\text{m}$).