

Maison de la Science



MAISON DE LA SCIENCE

PAR YVON RENOTTE

Docteur en sciences
Consultant HOLOLAB - ULg

Holographie, Hologrammes et (quelques) Applications

L'holographie a fêté le 50^e anniversaire de son invention en 2010 et pourtant d'intenses efforts de recherche et développement continuent à y être consacrés.

Elle est en général associée aux images spectaculaires tridimensionnelles, mais d'importants développements portent actuellement sur de nouveaux matériaux d'enregistrement et des domaines d'application aussi divers que des éléments diffractifs originaux et à usages multiples, la microscopie, le stockage massif d'information, la métrologie optique, l'holographie numérique et les télécommunications.

Comparée à une autre technique d'imagerie plus courante, la photographie, l'hologra-

phie apporte le relief en plus. Pour ce faire, elle nécessite un codage de l'information lumineuse diffusée par l'objet. Celui-ci est réalisé en faisant interférer sur un support photosensible la lumière issue de l'objet éclairé par un faisceau LASER, et une onde de référence identique issue de la même source.

La figure d'interférence, souvent fort complexe, ainsi formée apparaît après traitement du support. C'est l'hologramme de l'objet. Pour le lire, on le dispose dans un faisceau identique à l'onde de référence. L'observateur perçoit une image en relief « vrai » de l'objet dans la lumière diffractée par l'hologramme.

DES IMAGES... ET LE RELIEF EN PLUS

Qui n'a rêvé de faire de la photographie 3D ou de pouvoir visionner des films en relief, si possible sans lunettes et pourquoi pas, en évoluant dans la scène ?^a

LES PRÉMICES... LA CONCURRENCE...

Les dernières années nous ont familiarisés avec le **relief stéréoscopique**. La technique est spectaculaire et le succès foudroyant, à juste titre.

Le principe consiste à adresser séparément, à chacun des yeux du spectateur, des images plus ou moins décalées de la scène enregistrée. Le cerveau fait le reste.

La stéréoscopie est née au XIX^e siècle, à peu près en même temps que la photographie bien que des traces plus anciennes existent (XIII^e siècle, Oxford). De nombreuses techniques de séparation des images ont été inventées^b: par des images juxtaposées (*stéréoscopes*: *Wheatstone* et *Brewster* (1838-1840), *Holmes* (1850-1900), les visionneuses individuelles telles le système *View-Master*[®] à disques (1940)), par des images imbriquées (*réseaux lenticulaires*: de la photographie intégrale de *Lippmann* (prix Nobel de Physique en 1908) à l'autostéréoscopie de *Bonnet* (1940-1960): observation directe, sans instrument ni lunettes, en relief et en couleurs), par les couleurs (*anaglyphes*: *Rollmann* (1853), *D'Almeida* (1858) et *Ducos du Hauron* (1891) qui leur conféra l'appellation). Les premières ne permettent que l'observation rapprochée, voire individuelle, la dernière permet la projection, notamment le cinéma en relief (premier film projeté en public en 1915).

Stéréoscope de Holmes



Le port de lunettes à verres de couleurs différentes (un rouge et un bleu ou un vert) s'est rapidement avéré peu confortable, voire fatigant. L'avènement du *Cinemascope*[®] en 1954 va précipiter le désintérêt et la mise en veilleuse du procédé qui renaitra dans les années 1980.

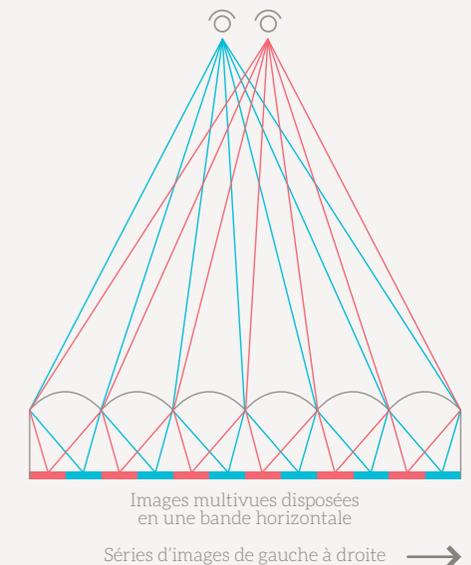
Actuellement, la séparation des images et l'adressage utilisent des méthodes plus performantes basées sur la polarisation croisée des faisceaux et la lecture via des lunettes à verres polarisants. Le rendu des couleurs et le confort des spectateurs ont encore été améliorés en ajoutant une lecture successive alternée par séparation temporelle des images. Ces améliorations de plus en plus sophistiquées ont conduit à des résultats spectaculaires et... bluffants.

Plus récemment, l'imagerie stéréoscopique a été adoptée par le numérique. La possibilité de construire des images 3D complexes a rapidement conduit à des applications diverses permettant l'observation sous des angles choisis, de molécules complexes, d'objets archéologiques et patrimoniaux «reconstitués», ou de monuments... jusqu'aux films d'animation.

Néanmoins, du point de vue strict de la physique, la technique «souffre» d'un défaut rédhibitoire: elle ne permet pas de restituer la *perspective* de la scène imagée. Elle fournit une image 3D figée dans la perspective, non modifiable, enregistrée par l'opérateur. Ce qui la distingue fondamentalement de la **technique holographique** qui permet de restituer cette caractéristique et qui m'autorise à la qualifier de «*technique de reproduction du relief vrai*»^c. Et c'est aujourd'hui encore la seule à permettre cette prouesse.

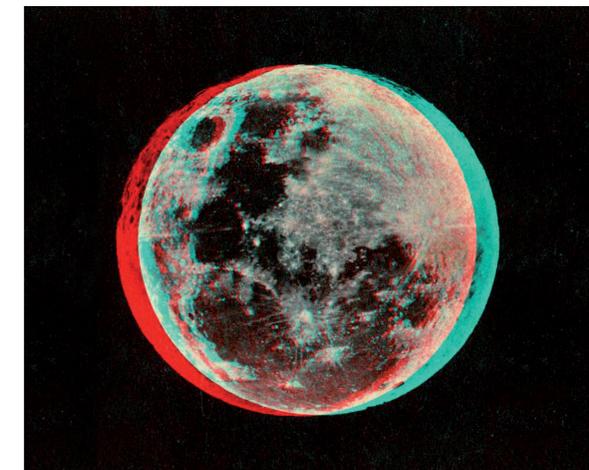
Quand l'holographie est apparue au début des années 1960, beaucoup ont cru à la photographie 3D «pour tout le monde». Après une dizaine d'années, l'engouement pour l'imagerie holographique est retombé, mais les industries et le milieu médical, notamment, continuent à bénéficier largement de la technique^d.

Il ressort clairement d'une comparaison, même rapide, des principaux points forts et points faibles des deux techniques que l'avantage est nettement dans le camp de la stéréoscopie et le restera tant que l'holographie ne réussira pas à s'affranchir des contraintes lors de l'enregistrement et des problèmes qui affectent le confort lors de la lecture. Celle-ci n'est pas simple et la qualité de l'image peut décevoir: 3D, mais immobile, le plus souvent monochromatique, et un champ de vision étroit.



Stéréoscopie : séparation par des images imbriquées (réseaux lenticulaires : photographie intégrale de Lippmann)

Stéréoscopie : séparation par les couleurs : anaglyphes
© The Moon published by Joseph L. Bates, 1860



Hologrammes digitaux en couleurs :
système i-Lumogram™
Panneau publicitaire pour la marque
Puma
© Geola UAB - Vilnius, Lituanie



Tous les éléments étaient réunis pour que le public finisse par boudier la performance scientifique à la base de l'imagerie holographique. Même si certains inconvénients ont été surmontés, telle la reproduction des couleurs, ce n'est pas encore le cas pour la reproduction du mouvement ou la lisibilité simultanée par plusieurs spectateurs. De rares exemples existent : il s'agit d'une succession rapide d'hologrammes d'une scène dont les éléments sont légèrement déplacés. P. Smigielski a réalisé deux films avec des images holographiques (1985). L'enregistrement est fastidieux, la lecture confidentielle (champ étroit) et le succès ne suivra pas.

Notons que cet aspect a connu des avancées significatives grâce aux progrès du numérique et à l'avènement des écrans à cristaux liquides et à diodes électroluminescentes.

L'HOLOGRAPHIE

COMPARAISON PHOTOGRAPHIE / HOLOGRAPHIE...

L'holographie est une technique d'enregistrement et de reproduction complète des images. L'appellation vient de deux mots grecs, «holos» et «graphein», ce qui signifie «écriture entière». Le document obtenu par ce procédé est appelé **hologramme**.

Les principes de l'holographie furent énoncés par D. GABOR en 1947, mais ce n'est qu'avec l'apparition du LASER [Light

Amplification by Stimulated Emission of Radiation] en 1960 que l'exploitation pratique a pu commencer. La méthode devait permettre de corriger de mauvaises photographies électroniques. Elle lui valut le Prix Nobel de Physique en 1971.

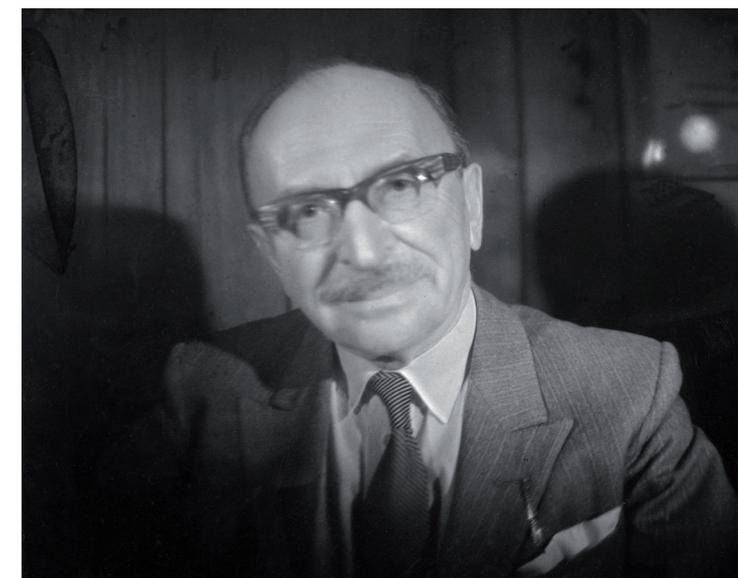
On qualifie couramment l'holographie de «photographie en relief» quoique les deux techniques d'enregistrement d'images soient très différentes.

La photographie est une technique déjà ancienne (premières photographies : Niépce vers 1816-1818). Il s'agit d'une distribution 2D de pixels plus ou moins sombres selon l'éclairage reçu. L'information «couleur» est éventuellement ajoutée par traitement chimique. Pendant près de deux siècles, le matériau d'enregistrement fut l'émulsion photographique argentique. Depuis quelques décennies, il a progressivement été supplanté par des capteurs à semi-conducteurs, CCD [Charge-Coupled Device] et CMOS [Complementary Metal Oxyde Semiconductor].

L'holographie est une technique d'enregistrement des franges produites par l'interférence entre le front d'onde objet diffusé par la scène holographiée, et une onde de référence^{de}. Elle permet de coder l'entièreté de l'information issue de la scène, la distribution des éclairages et celle des phases. Il en résulte la possibilité de reproduire le relief de la scène, y compris la perspective. L'information codée est enregistrée en volume. Après traitement du matériau, l'hologramme se présente donc comme un réseau de diffraction 3D.

Dans un premier temps, le matériau d'enregistrement holographique fut également argentique, mais les émulsions devaient être spécialement préparées. Par la suite, de nombreux matériaux ont été testés. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec des gélamines dichromatées et plus récemment des photopolymères.

Il est évident qu'excepté le matériau d'enregistrement argentique, les deux techniques n'ont pas grand-chose en commun. L'holographie nécessite de travailler en deux temps. Lors de l'enregistrement, il faut coder l'information par interférométrie. D'où la nécessité d'utiliser une source de lumière LASER. Le photorécepteur enregistre simultanément, sous



Photographie d'un hologramme
de réflexion - 1960 ou 1970
Dennis Gabor (1900-1979)

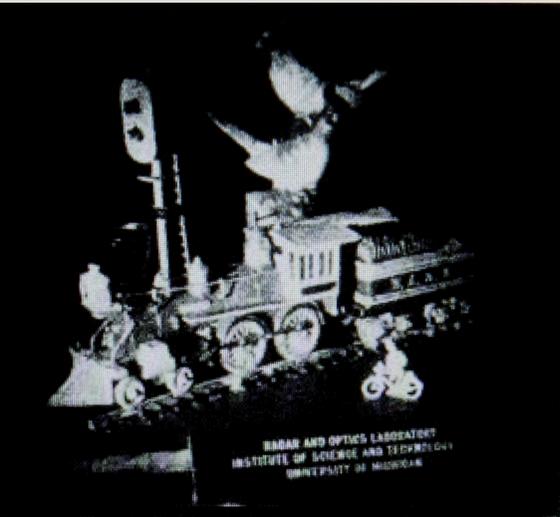
© Collection National Portrait Gallery, London

Hologramme d'amplitude
en transmission (agrandi 2400 fois)
© Alain Debay, Club Athena - asbl ICARE, Charleroi



« Train and Bird »
Le premier hologramme fabriqué au LASER (1964) par Emmeth Leith et Juris Upatnieks à l'université du Michigan.

Leith et Upatnieks se préparent à enregistrer un hologramme de transmission en utilisant la technique « hors axe ».



forme d'interférences, l'onde de référence et l'onde objet. Après traitement du matériau insolé, l'hologramme apparaît sous forme d'une moirure complexe non directement lisible. Il doit être décodé lors de la reconstruction en l'éclairant à l'aide de la lumière LASER, sous l'angle d'incidence de l'onde de référence.

La qualité de l'hologramme dépend de nombreux paramètres: la stabilité de l'agencement et les propriétés de cohérence de la lumière éclairant la scène lors de l'enregistrement, le rapport de puissance entre le faisceau objet et le faisceau de référence, la géométrie utilisée pour l'exposition, le matériau d'enregistrement, le traitement du support exposé, les conditions de relecture... La technique holographique n'est pas simple à mettre en œuvre, mais la plupart des variables évoquées sont contrôlables et peuvent être ajustées par un holographiste expérimenté.

10 ANNÉES ET (PRESQUE) TOUT ÉTAIT DIT... LES TYPES D'HOLOGRAMMES LES PLUS COURANTS...

L'histoire de l'holographie peut se résumer en trois phases⁶.

La première phase est l'invention de l'holographie par Gabor (1947-48).

Son but était d'améliorer la résolution du microscope électronique. En vue de montrer la faisabilité de sa méthode, il réalisa des tests dans le domaine optique. L'Hologramme de Gabor appartient à la famille des hologrammes de transmission « en ligne ».

L'intérêt de la communauté scientifique fut grand, mais les objets holographiés devaient être de petite taille et opaques sur fond transparent, ce qui limitait fortement le champ des applications possibles.

La deuxième phase débuta aux États-Unis avec les travaux de E. N. Leith et J. Upatnieks (1962-64) et l'avènement du LASER (1960) qui fournit une source cohérente suffisamment puissante.

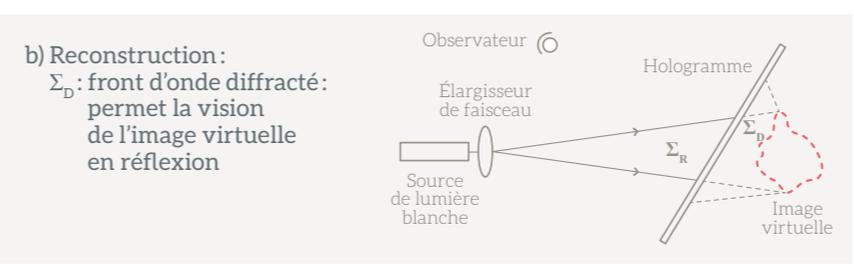
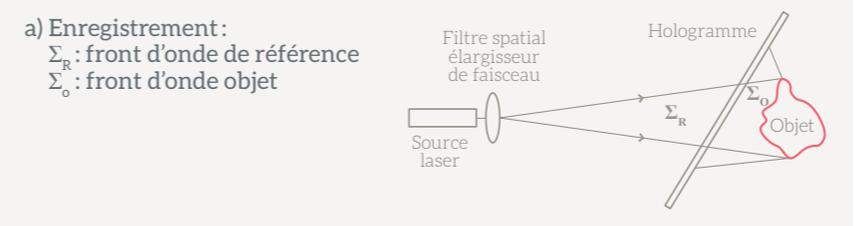
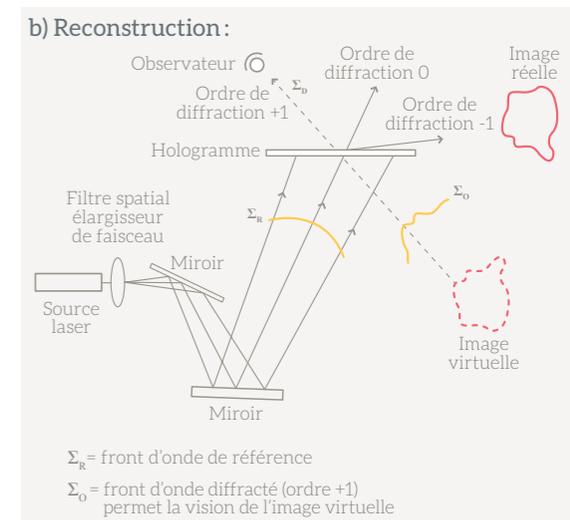
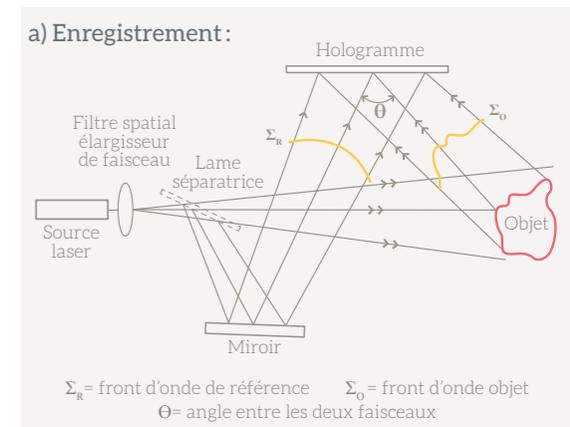
La solution retenue est de travailler « hors axe », le faisceau de référence éclaire la plaque sous un certain angle. Un réseau est enregistré dans le matériau photosensible et l'information de la phase, donc le relief, est codée par modulation interférométrique.

Les hologrammes sont également des hologrammes de transmission, mais « hors axe ». Les figures ci-contre montrent les montages d'enregistrement et de lecture. On notera que le faisceau utilisé pour la lecture est ici aussi analogue à celui de référence de la construction. Elle est réalisée par éclairage LASER, mais

la visibilité de l'image virtuelle (orthoscopique), qui apparaît en lieu et place de l'objet lui-même, est rendue possible grâce à l'utilisation du montage « hors axe ». L'éclairage LASER entraîne que l'image est monochromatique, de la couleur du faisceau de lecture. Une image réelle (pseudoscopique) est également observable moyennant une astuce simple, pivoter l'hologramme d'un demi-tour sur lui-même à la lecture. Une particularité des images holographiques ainsi reconstruites est leur granularité (speckle). Ce phénomène est dû au LASER qui produit des micro-interférences (tavelures) distribuées aléatoirement dans le champ éclairé.

D'autres innovations furent apportées à cette époque. En Union soviétique, Y. N. Denisyuk (1963-65) utilise un montage tel celui des figures ci-dessous dans lequel les sens de propagation des ondes objet et de référence sont opposés. Le résultat est un hologramme par réflexion « en ligne », construit sous éclairage LASER, mais lisible en lumière blanche. L'image holographique apparaît d'une couleur différente de celle utilisée à l'enregistrement, de longueur d'onde inférieure. Ce phénomène est dû au rétreint du matériau lors du traitement, qui rapproche les plans du réseau en volume. L'hologramme se comporte en « filtre interférentiel » et sélectionne les longueurs utiles à sa lecture.

Ce type d'hologramme permet des effets de profondeur extraordinaires par lesquels on voit littéralement l'objet holographié « sortir » du plan de l'hologramme. Ce sont des « hologrammes d'hologrammes » appelés « deuxième génération ».



Hologramme de transmission « hors axe » (Leith - Upatnieks)
a) Enregistrement :
Σ_R : front d'onde de référence
Σ_O : front d'onde objet
b) Reconstruction :
Σ_D : front d'onde diffracté : permet la vision de l'image virtuelle en transmission

Hologramme de réflexion « en ligne » (Denisyuk)



Hologramme de réflexion en exposition à la Maison de la Science.

Hologramme multiplex.

Les photographies présentent différents aspects d'une scène enregistrée dans un hologramme sous différents angles lisibles en fonction de la position du spectateur.

© Par courtoisie de Geola Digital, Vilnius, Lituanie



Notons les apports de S. A. Benton (1969-77) et de L. Cross (1972-79): les hologrammes «arc-en-ciel», lisibles en lumière blanche, très lumineux et en pseudo-couleurs pour le premier; les hologrammes multiplexés (ou stéréogrammes holographiques) qui associent les caractéristiques de la stéréoscopie à la technique holographique «arc-en-ciel» pour le second. Ces derniers permettent de produire un pseudo-mouvement lorsque le spectateur se déplace.

Ce sont des variantes «sophistiquées» des hologrammes de Denisyuk, «deuxième génération».

La troisième phase, après les années 1970, marque une nouvelle période pour l'holographie, essentiellement tournée vers le réalisme. En même temps que l'intérêt du grand public pour l'imagerie décroît, l'holographie est devenue une technique reconnue et intégrée dans de nombreux domaines.

Les hologrammes estampillés (ou embossés), variante des hologrammes «arc-en-ciel», rencontrent un beau succès en raison de leurs nombreuses applications. Ils sont enregistrés dans des photorésines donnant des réseaux holographiques en relief de surface (l'épaisseur varie en fonction de l'éclairement reçu: F. Iwata et al., 1974). Une copie contact métallique de l'hologramme permet de multiplier l'image 3D par estampillage thermique dans des matériaux plastiques.

Les progrès de l'informatique et de la vidéo ont permis la naissance de l'holographie numérique et des hologrammes synthétiques, générés par ordinateur (Computer Generated Holograms, J. W. Goodman et al., 1967). La technique, sans cesse améliorée, s'est largement installée. Un de ses intérêts tient au fait que la reconstruction numérique permet d'appliquer des traitements aux hologrammes pour améliorer la qualité des images ou extraire des informations.

L'HOLOGRAPHIE EN COULEURS "HAUTE RÉOLUTION"

L'holographie en vraies couleurs «haute résolution» est sans conteste la technologie d'imagerie la plus parfaite connue, les images qu'elle produit sont presque impossibles à distinguer de la scène originale^f.





Des techniques existent pour donner l'apparence de la couleur à un hologramme monochromatique, mais ce sont des *pseudo-couleurs*, non les couleurs d'origine de l'objet. Nous en avons évoquées deux : les hologrammes arc-en-ciel et les hologrammes en réflexion.

L'enregistrement d'un hologramme couleurs « haute résolution » nécessite au moins trois enregistrements, un rouge, un vert et un bleu, superposés dans un matériau photosensible panchromatique (sensible à l'ensemble des radiations du spectre visible). Ce type d'hologramme appartient à la « famille des Denisjuk ».

Bien qu'il ait été possible de fabriquer des hologrammes monochromatiques de très bonne qualité depuis les années 1960, il y a eu peu d'amélioration des matériaux d'enregistrement par rapport aux autres aspects de la technique holographique. Les possibilités d'enregistrement d'hologrammes en couleurs sont rares, seules quelques sociétés poursuivent une production modeste, mais de qualité⁸.

DES APPLICATIONS

L'holographie intervient dans des domaines aussi divers que le monde médical, l'industrie lourde et de haute précision, la vérification de production, l'art et le patrimoine. La liste n'est ni limitative ni exclusive. Nous avons choisi de présenter deux exemples développés au HOLOLAB - ULg (Laboratoire d'optique, photonique et applications des LASERS).

LA "LUMINETTE" DE L'HOLOGRAPHIE À LA LUMINOTHÉRAPIE^h

L'absence de soleil agit sur notre moral et peut parfois conduire à la dépression ou à l'insomnie. La luminothérapie offre des traitements aux personnes souffrant de tels troubles saisonniers. C'est dans ce contexte que le HOLOLAB et le *Centre d'Étude des Troubles de l'Éveil et du Sommeil* (CHU de Liège) ont conçu la « *luminette*® ». Elle est le fruit d'un projet cofinancé par la Région Wallonne et la société de Constructions Électriques *Schröder s.a.*, à l'origine de la création de la société « *Lumined s.a.* »ⁱ, distributrice depuis 2005.

La luminothérapie est connue depuis plusieurs années, notamment sous la forme d'écrans lumineux. Ils ont des effets similaires à ceux de la lumière naturelle, synchronisant nos rythmes biologiques circadiens qui maintiennent notre équilibre veille

sommeil. Ils présentent néanmoins un inconvénient, il faut s'armer de patience pour rester un temps suffisant face à l'écran. Des dispositifs portables ont été mis au point, mais ils étaient peu confortables. L'innovation de la « *luminette* » réside dans sa portabilité et dans l'exploitation de microtechnologies telles que l'holographie. Il s'agit d'un dispositif ergonomique semblable à une paire de lunettes qui fait pénétrer la lumière dans l'œil jusqu'aux zones de la rétine favorables au traitement tout en conservant une vision quasiment parfaite de l'environnement. La « *luminette* » permet une grande liberté de mouvement et même le port de lunettes correctrices.

Le dispositif concentre les faisceaux lumineux utiles dans la partie inférieure de la rétine, quel que soit l'angle d'inclinaison de l'œil. Les composants diffractifs sont collés sur les verres d'une paire de lunettes. Ce sont des microreliefs obtenus par enregistrement holographique.

L'éclairage est fourni par des diodes électroluminescentes placées au-dessus de chaque verre, en dehors du champ de vision.



La luminette®

LES PROJETS OSIRIS, DEIOS ET MINT DE L'ARCHÉOMÉTRIE À LA SIDÉRURGIE^j

L'archéologie est continuellement confrontée au problème du relevé des objets de son étude. Afin d'apporter une réponse à ce problème, le laboratoire HOLOLAB et le *Centre Européen d'Archéométrie* de l'université de Liège se sont associés pour lancer le projet OSIRIS (*Optical Systems for Interferometric Relief Investigation and Scanning*) de développement d'un dispositif de relevé numérique des documents archéologiques, en trois dimensions, qui exploite le principe du *moiré optique*. Les impératifs de l'histoire de l'art et de l'archéologie imposent que l'instrument devra répondre à des contraintes très sévères. La méthode consiste à projeter une grille lumineuse sur l'objet étudié, dont la déformation servira d'outil de mesure du relief.

Illustrations page précédente et ci-dessus :
Hologrammes couleurs haute résolution
Réalisés par Yves Gentet
© The Ultimate Holography - France



Scanner 3D développé par DEIOS s.a. dans le cadre du projet OSIRIS
Projection de franges interférométriques

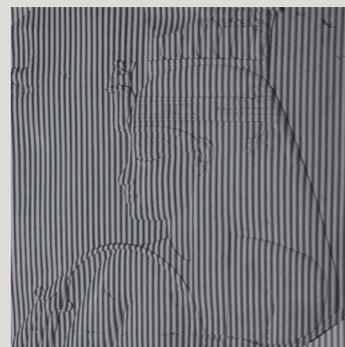
Les différentes étapes d'un enregistrement et d'une reconstitution 3D

Par le biais d'une caméra, il est possible de superposer électroniquement l'image du réseau déformé à un cliché de référence du même motif exempt de déformation. L'interprétation des figures ainsi obtenues permet de restituer le relief analysé sur un support informatique. Le degré de précision de la saisie est au moins comparable à celui des techniques traditionnelles, mais l'opération est beaucoup plus rapide et autorise le traitement immédiat de surfaces. Le projet OSIRIS a donné naissance à une spin-off, DEIOS s.a. (*Development and Enhancement of Interferometric Optical Systems*) qui a développé des outils de saisie 3D. La projection et la lecture des franges sont réalisées par un dispositif original composé d'éléments optiques diffractifs spécifiques conçus au HOLOLAB.

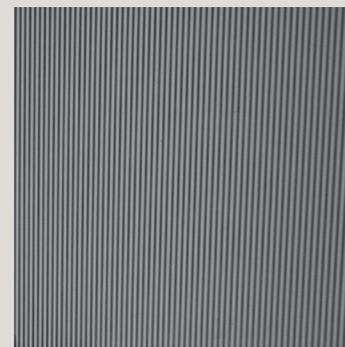
Vu le niveau d'exigence souhaité, de nombreux autres domaines d'applications étaient envisageables. Le scanner a donc été amélioré dans le cadre d'un projet de *Maintenance INTelligente* pour la sidérurgie, le projet MINT (2007-2012). Il en résulte un outil très performant à champs d'application particulièrement diversifié.



1. Objet : bas-relief égyptien



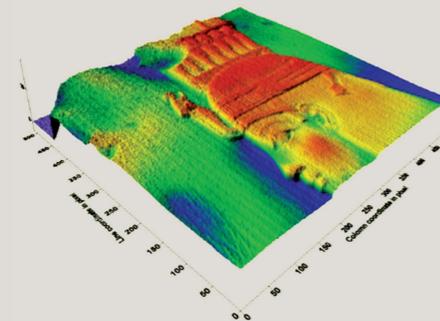
2. Franges interférométriques projetées sur l'objet et déformées par son relief



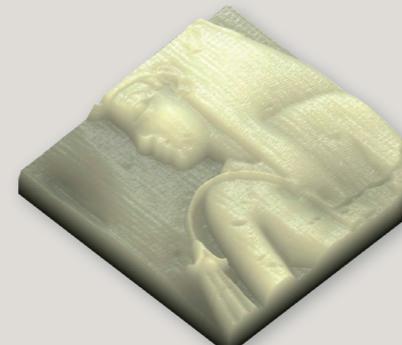
3. Réseau (virtuel) de référence non déformé



4. Interférogramme (figure de phase) résultant de la combinaison des deux figures précédentes



5. Reconstitution numérique du bas-relief en fausses couleurs



6. Copie 3D du bas-relief par usinage LASER (dans un matériau polymère) obtenue à partir de la reconstitution numérique (principe de l'imprimante 3D)

- ||| a) E. DI PIETRO, *Holographie, Une technique lumineuse... toujours d'actualité* (interview de Y. Renotte, HOLOLAB, ULg), Le 15^e, n° 160, janvier 2007
- ||| b) O. CAHEN, *L'image en relief, de la photographie stéréoscopique à la vidéo 3D*, éd. Masson, Paris (1990)
- ||| c) P. HARIHARAN, *Optical Holography – Principles, Techniques and Applications*, Cambridge University Press (1996); *Basics of Holography*, Cambridge University Press (2002)
- ||| d) P. SMIGIELSKI, *L'holographie industrielle*, éditions Technéa (1994)
- ||| e) Y. LION et Y. RENOTTE, *Novotique: le LASER*, Technorame, La vitrine des technologies nouvelles, Club Athena (numéro spécial), pp. 26-27 (1988/89)
- ||| f) H. BJELKHAGEN and D. BROTHERTON-RATCLIFFE, *Ultra-Realistic Imaging - Advanced Techniques in Analogue and Digital Colour Holography*, CRC Press, Taylor & Francis Group (2013)
- ||| g) Matériaux argentiques: Slavich (uab Geola Digital, Lituanie), *Ultimate Holography* (Yves Gentet, France), *Colour Holographic Ltd* (UK), *SilverCross Project* (H. Bjelkhagen, UK) – CEC Research Project (2005-07), 7 partenaires dont HOLOLAB
Matériaux photopolymères: DuPont de Nemours, Bayer MaterialScience, Dai Nippon Printing Co., Polygrama Brazil
- ||| h) Y. RENOTTE, *Au croisement de l'Optique et de la Photométrie: «La Luminette®»*, Science et Culture, 407 (2007), pp. 75-83
E. GALETIC (Schröder s.a.), R. POIRRIER (CETES - CHU Liège), Y. RENOTTE et V. MOREAU (HOLOLAB - ULg) – interview Ph. Crêteur, *Application de l'optique diffractive pour un appareil de lumentherapie: la luminette®*, Le Journal des Ingénieurs, 107 (2007), pp. 2-6
- ||| i) Lucimed s.a., rue des Marlières, 22B, 4450 Villers le Temple, www.lucimed.com
- ||| j) Y. RENOTTE* (HOLOLAB, université de Liège), D. LABOURY (Egyptologie & Centre Européen d'Archéométrie, ULg), B. TILKENS*, V. MOREAU*, M. MORANT (Interface Entreprises-ULg), *At the crossing of Physics and Archeology: the OSIRIS Project (Optical Systems for Interferometric Relief Investigation and Scanning) - Development of a device for 3D numerical recording of archeological and epigraphic documents by optoelectronic processes*, Europhysics News, 35 / 6, (2004), pp. 205-207