

Holographie,
Hologrammes,
Avatars électroniques,
ce que l'on ne vous a pas dit . . .

[2^e partie]

[version provisoire et incomplète – avril 2023]

Yvon Renotte, Dr Sci., enseignant-chercheur honoraire de l'Université de Liège
Past-prof invité, co-fondateur du HOLOLAB, Dépt. AGO (Astrophysique)

y.renotte@uliege.be – <https://orbi.uliege.be/profile?uid=p041181> - www.linkedin.com/in/yvon-renotte-54a91a13
<https://hdl.handle.net/2268/300493>

Résumé

Bien qu'âgée de plus d'un demi-siècle, l'holographie continue à être relativement mal connue, tant scientifiquement qu'en terme d'applications. Il est vrai que son aspect le plus spectaculaire, l'imagerie, est sans doute celui qui a le moins bien "réussi" faute d'avoir pu percer auprès du grand public et en dépit d'une évolution "fulgurante" à ses débuts. Aujourd'hui ce sont surtout les applications industrielles, aéronautique et espace, médicales, éducatives, voire militaires qui continuent à se développer sans que le public s'en rende compte. A côté, plusieurs techniques d'imagerie plus spectaculaires les unes que les autres ont vu le jour et occupent le terrain en s'appropriant la qualification abusive "d'holographique". Ce sont principalement des répliques de Pepper Ghosts, et plus récemment des avatars électroniques. Sans doute, devons-nous nous accommoder de cette mode puisqu'elle a les faveurs et l'intérêt du grand public ? Mais il est de notre devoir de signaler que ce ne sont pas de "vrais hologrammes".

Abstract

Holography, Holograms, Electronic Avatars, What They Didn't Tell . . .

Although more than half a century old, holography continues to be relatively poorly understood, both scientifically and in terms of applications. It is true that its most spectacular aspect, the imagery, is undoubtedly the one that has been the least "successful" for lack of having been able to break through to the general public and despite a "dazzling" evolution at its beginnings. Today it is mainly industrial, aeronautics and space craft, medical, educational and even military applications that continue to develop without the public realizing it. Besides, several imaging techniques, each more spectacular than the other, have emerged and occupy the field by appropriating the abusive qualification of "holographic". They are mostly Pepper Ghosts replicas, and more recently electronic avatars. Undoubtedly, will we have to accommodate ourselves to this assertion since it has the favors and the interest of the general public ? But it is our duty to point out that these are not "real holograms".

Sommaire

Imagerie 3D : les Bases

[La photographie : Historique – Rappels](#) p.3

[La photographie numérique](#) p.5

[L'holographie : Historique – Rappels](#) p.6

Les processus photographique, holographique et stéréoscopique

[Le processus photographique](#) p.7

[Le processus holographique](#) p.8

[La stéréoscopie](#) p.10

[Les différents types d'hologrammes](#) p.13

[La géométrie : hologrammes par transmission et par réflexion](#) p.14

[Commentaires](#) p.15

[Images virtuelle et réelle – hologramme de seconde génération](#) p.16

Le matériau d'enregistrement

[Hologrammes d'amplitude et de phase](#) p.16

[Hologrammes surfaciques \(mince\) et en volume \(épais\)](#) p.17

[Résumé : à chaque réseau son hologramme](#) p.18

Imagerie 3D : les Bases

Photographie et holographie sont deux techniques d'imagerie souvent « associées » par le public qui qualifie volontiers la seconde de « *photographie en relief* ». À tort parce qu'elles sont très différentes. Ce ne sont pas deux variantes d'un même processus mais *elles sont à la fois une technique, un art et une science* !

Quelques rappels

La photographie est née au tout début du 19^e siècle¹. On peut dire qu'elle a été inventée par le Français *Nicéphore Niépce* (1765-1833). Ses plus anciennes photographies dont nous disposons datent de 1826 ou 27, elles sont conservées dans les collections de l'Université du Texas à Austin. L'idée semble dater d'un voyage en Sardaigne effectué en 1797. Il a effectué ses premiers essais vers 1815-16 (à l'époque de la bataille de Waterloo !). On dispose d'*héliographies* (c'est ainsi qu'on appelait ces images enregistrées sur du *bitume de Judée photosensibilisé*, étalé sur plaque métallique), malheureusement le matériau était très peu sensible, les contrastes faibles et les traitements post-exposition complexes. Les temps de pose de plusieurs heures entraînent que les photos ne concernaient que des objets fixes. Des « photographies » datant de 1817 existent mais elles ont très mal vieilli notamment parce qu'elles n'étaient pas fixées: elles n'ont quasiment plus de contraste. C'est plus tard, dans les années post 1820 qu'il tentera de sensibiliser ses échantillons par des vapeurs de halogénures tels le brome et le chlore. *Il meurt subitement sans que son invention ne soit reconnue*. L'émulsion argentique apparaîtra plus tard dans les années 1830-40, en Angleterre et non en France où *Louis Daguerre* (1787-1851) fut officiellement déclaré « inventeur de la photographie » dès 1835 par déclaration officielle de *François Arago* (1786-1853) devant l'Académie (19 août 1839), et longtemps considéré comme tel par beaucoup (de Français) . . . alors que le vrai inventeur était réellement Français.

La technique a évolué rapidement et s'est implantée durablement au sein du public après qu'il soit devenu possible de fixer durablement les images développées. En 1838, le **daguerréotype**, premier procédé comportant une étape de développement utilisait une plaque d'argent recouverte d'une fine couche d'iodure d'argent. Une *image latente invisible*, formée par une exposition à la lumière dans une *chambre obscure* *, apparaissait sous l'action de vapeurs de mercure. *Le développement réalisait une telle amplification de l'effet de la lumière*, que le temps de pose ne dépassait plus 30 minutes. Le fixage était obtenu par immersion dans de l'eau saturée de sel marin : la photographie argentique était née².

*) **La chambre noire** (« camera obscura ») est constituée d'une boîte fermée, étanche à la lumière, dont une des faces est percée d'un tout petit trou, le sténopé. L'image inversée d'un objet éclairé placé à l'extérieur, devant le trou, se forme sur la paroi opposée. Connue depuis l'Antiquité [*Aristote* (384-322 av. J.-C.)], perfectionnée au Moyen-Âge [*Al-Haytham* (965-1038)] elle fut utilisée par de nombreux artistes [*Léonard de Vinci* (1452-1519), *Giovanni Antonio Canaletto* (1697-1768) et peut-être *Johannes Vermeer* (1632-1675)]²

Titillé par l'annonce des résultats précédents, l'Anglais *William Henry Fox Talbot* (1800-77) reprend des recherches interrompues et brevète en 1841 le **calotype**, premier procédé négatif/positif qui permet la multiplication d'une même image grâce à l'obtention d'un négatif intermédiaire sur un papier au

-
1. Jacqueline Belloni-Coller, Jean Amblard, Jean-Louis Marignier et Mehran Mostafavi, *La photographie révélée*, La Recherche, 217 (1990), 48-56 ; Bernard Perrine et Jacqueline Belloni, *Histoire de la photographie – Le développement photographique et la chimie de l'argentique*, Colloque sur la photographie – Académies des sciences et des beaux-arts, séance commune du 15 décembre 2015, Paris (2015), 8 pages
 2. Yvon Renotte, *De la primitivité des émulsions photographiques*, <https://hdl.handle.net/2268/260565> (1982) ; *L'école de photographie de Liège*, Science et Culture, 257 (1982), 9-12 ; *La photographie : de l'argentique au numérique, du sténopé aux lentilles « liquides autofocus »*, <https://hdl.handle.net/2268/258714> ; U3A (30-01-2018), 16 pages

chlorure d'argent rendu translucide avec de la cire. Les innovations, le plus souvent intuitives, vont s'enchaîner :

- 1839, *John Herschell* (1792-1871) découvre le moyen de *fixer les images* en les immergeant dans un *bain d'hyposulfite de soude*, encore aujourd'hui le composé essentiel des fixateurs en photographie argentique.
- 1841, *Hippolyte Fizeau* (1819-96) remplace l'iodure d'argent par le *bromure d'argent* dont la sensibilité à la lumière est bien supérieure : *il ne suffisait plus alors que de quelques secondes de pose pour obtenir une image correcte*.
- 1869, *Louis Ducos du Hauron* (1837-1920) enregistre la **première photographie en couleurs** en appliquant le *principe de la trichromie* démontré par *J.C. Maxwell* (1859)³. Il réalise trois photographies d'un même sujet au travers de filtres respectivement rouge, bleu et vert et obtient trois positifs qu'il colore dans la couleur qui les avait produits. En superposant exactement les trois images, il restitue les couleurs de l'objet.
- 1871, *Richard Maddox* (1816-1902) remplace le collodion par **la gélatine** comme substrat, procédé perfectionné par *Charles Bennet* (1840-1927) qui montre que la sensibilité des plaques gélatinées peut être augmentée par des traitements physico-chimiques ce qui permet d'abaisser la durée d'exposition nettement sous la seconde.
- 1888, *Georges Eastman* (1854-1932), fondateur de la société *Kodak*, conçoit l'idée du support souple : les plaques de verre sont progressivement remplacées par les rouleaux de celluloid.
- 1891, *Gabriel Lippmann* (1845-1921 - *prix Nobel de physique en 1908*) met au point une technique fournissant directement des photos en couleurs sur une seule plaque, par un procédé interférentiel qui préfigurait l'holographie³. Trop complexe, cette invention ne put rivaliser avec les procédés concurrents (issus de la chimie des colorants tels AgfaChrome et KodaColor).
- 1948, *Edwin H. Land* (1909-91)² développe les appareils à développement instantané chez *Polaroid Co* (USA-1937), adaptés à la couleur en 1962.
- 1981, la société *Sony Co* (nippon-américaine) sort le premier APN (*Appareil Photographique Numérique*) : le *Mavica* – capteur CCD, 279300 pixels, stockage sur des disquettes 3.5". L'écran LCD (cristaux liquides) au dos apparaît chez *CASIO Co Ltd* (Japon) en 1995 et *Canon Inc* (Japon) produit le premier appareil reflex numérique à usage grand public en 2003.
- 2002 : *la photographie numérique supplante la photographie argentique*.

Figure 1 – Ils ont inventé la photographie argentique



Nicéphore Niépce
(1765-1833)



Louis Daguerre
(1787-1851)



W.H. Fox Talbot
(1800-77)



Louis Ducos du
Hauron (1837-1920)



Richard Maddox
(1816-1902)



Sir Nevill F. Mott
(1905-96) *

*) Prix Nobel de physique 1977

Pour diminuer le temps de pose, on créa des objectifs de courtes longueurs focales, plus lumineux tout en gardant la netteté sur toute l'image. En même temps, l'augmentation de la sensibilité des plaques nécessita la conception de mécanismes (obturateurs) capables de laisser entrer la lumière dans l'appareil pendant 1/100, voire 1/1000 de seconde. En même temps, il fallut évaluer précisément l'intensité de la lumière et le posemètre devint un véritable instrument de mesure.

3. Yvon Renotte, *Holographie, Hologrammes, Avatars électroniques, ce que l'on ne vous a pas dit . . .*, <https://hdl.handle.net/2268/300493> (2023), 40-50

Extraordinaire facteur d'amplification, le développement a autorisé des gains en sensibilité considérables qui ont ouvert la voie à d'énormes avancées technologiques et industrielles dont le cinématographe, inventé par les frères Auguste et Louis Lumière (1862-1954 et 1864-1948) ², qui n'est en fait qu'une cascade d'images, toutes fixes mais de pose extrêmement courte et rapprochées dans le temps . . . et beaucoup plus tard, la mise au point d'émulsions à grains très fins, suffisamment sensibles pour l'enregistrement holographique, qui réussissent la gageure d'associer dans un même matériau photosensible deux paramètres a priori antagonistes : une haute sensibilité et une taille submicroscopique !

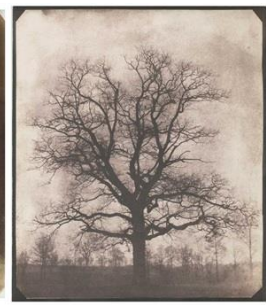
Figure 2 – Les pionniers de la photographie



N. Niépce : Point de Vue (1826)
Saint-Loup de Varennes



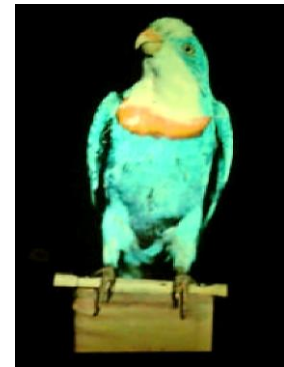
Daguerréotype (1840)
Autoportrait



Calotype de Fox Talbot (1842)



Environs de la ville d'Agen (1877)
Photographie de L. Ducos du Hauron ⁴



Photographies en couleurs de G. Lippmann obtenues par interférences (1891 et 1899)

Curieusement, alors que la photographie était déjà un art et une technique évolués, il fallut attendre l'avènement de la physique quantique et de la théorie des matériaux pour qu'une interprétation scientifique soit proposée par *Ronald W. Gurney* (1898-1953) et *Sir Nevill F. Mott* (1905-96 – prix Nobel de physique en 1977). Plusieurs sociétés avaient vu le jour depuis plusieurs dizaines d'années : *Agfa GmbH* (D-1867) et *Gevaert n.v.* (B-1894) fusionnées en 1964, *Ilford Photo* (GB-1879), *Eastman-Kodak Co* (USA-1881), *Pathé s.a.s.* (F-1891) pour n'en citer que quelques-unes parmi les plus connues.

Si l'**appareil photographique argentique** était un concentré d'optique, de mécanique et de chimie ayant connu une évolution lente, l'**appareil numérique** est un concentré très différent d'optique, de micromécanique et d'informatique qui se perfectionne à grande vitesse. Les algorithmes et logiciels y occupent une place prépondérante, leur souplesse expliquant la rapidité de l'évolution actuelle. Avant la prise de vue, l'informatique embarquée réalise automatiquement les fonctions de réglage du diaphragme, de la vitesse, de la sensibilité et de la mise au point, ou assiste l'utilisateur pour ces fonctions s'il le souhaite. **L'image enregistrée et numérisée n'est plus que de l'information pure sur laquelle vont s'appliquer des algorithmes de plus en plus sophistiqués** ⁵.

4. Nathaniel Herzberg, *Les premières photographies couleur révèlent leurs secrets*, Le Monde Actualité – Science & Médecine, N° 22270 (28-03-2018), 2

5. Gérard Berry, *Comment l'algorithmique a changé la photographie ?* ; Frédéric Guichard, *Les appareils photo du futur*, Colloque sur la photographie – Académies des sciences et des beaux-arts, séance commune du 15 décembre 2015, Paris (2015), 8 pages

Les appareils de haute qualité ont peu ou prou gardé le même format physique que leurs parents argentiques, ce qui n'est pas le cas de ceux incorporés dans d'autres systèmes tels les téléphones et tablettes numériques. Le numérique a changé profondément la photographie, mais aussi l'appareil photo lui-même : il a contribué à la miniaturisation et à la banalisation des appareils. *La complexité a progressivement migré de la physique (optique et capteur) vers l'informatique (circuits et logiciels), permettant la miniaturisation et la réduction des coûts des composants.* Nos téléphones disposent d'appareil photos dont les performances dépassent parfois celles des meilleurs appareils des années 2000.

Nous ne nous attarderons pas ici sur le mécanisme physico-chimique de formation de l'image argentique ni sur le fonctionnement des capteurs CCD et CMOS intervenant en photographie numérique. Une littérature spécialisée est disponible ^{1,6,7}.

L'holographie Imaginée dans l'immédiat après-guerre (1948) par le physicien anglo-hongrois *Dennis Gabor* dans le souci d'améliorer l'imagerie des microscopes électroniques, est fondée sur la manipulation des ondes et des interférences. Un deuxième concept novateur apparaît vers la fin des années 1950 à Leningrad (aujourd'hui Saint-Pétersbourg) où un doctorant, *Yuri Denisjuk*, cherche à enregistrer et à reproduire les caractéristiques complètes d'un champ d'ondes lumineuses afin de visualiser une scène tridimensionnelle en couleurs. Il reprend et généralise certains aspects du procédé photographique imaginé par *Gabriel Lippmann* (1845-1921). Pour réussir, il a besoin de *lumière cohérente* ⁸. . . et les sources lumineuses disponibles à l'époque sont insuffisamment cohérentes.

Il faudra attendre l'invention du LASER ⁸ en 1960 pour disposer de la source de lumière indispensable au développement de l'imagerie holographique. À l'Université du Michigan, en 1961, avec son collègue *Juris Upatnieks*, *Emmett Leith* élabore une méthode pour encoder, puis reconstruire une image par le processus d'hologramme en deux étapes : ***l'imagerie holographique est vraiment née***. Les développements et les applications progressent rapidement, les innovations s'enchaînent : l'holographie devient plus familière.

Figure 3 – Ils ont inventé l'holographie et l'imagerie holographique



Dennis Gabor
(1900-79) *

Yuri Denisjuk
(1927-2006)

Emmett Leith
(1927-2005)

Juris Upatnieks
(1936)

Stephen Benton
(1941-2003)

Lloyd Cross
(1933-2015)

*) Prix Nobel de physique 1971

Une variante intéressante des hologrammes généralement qualifiée d'*arc-en-ciel*, est développée par *Stephen Benton* et rendue publique au début des années 1970. La dernière addition majeure à la boîte à outils de l'holographie pendant les années 1970 est celle du *stéréogramme holographique* développé

-
6. Pierre Glafkidès, *Chimie et physique photographiques – 2 tomes*, Éditions de l'Usine – 5^e édition (1987) ; Hans I. Bjelkhagen, *Silver-Halide Recording Materials for Holography and their Processing*, Springer-Verlag – Series in Optical Sciences, Vol.66 (1993)
 7. Michael Bass ed., *Handbook of Optics*, McGraw-Hill Inc., 2^d ed. (1995) : Vol. I, Chap.22, Timothy J. Tredwell, *Visible Array Detectors* ; Vol.II, Chap.15, Norman Goldberg, *Cameras*, Chap.16, Ellis Betensky, M. Kreitzer and J. Moskovich, *Camera Lenses*
 8. Pierre Léna et Alain Blanchard, *Lumières, une introduction aux phénomènes optiques*, InterEditions (1990), 197-236

par le physicien *Lloyd Cross*. Dans sa forme la plus simple, le stéréogramme est une série d'hologrammes de Leith-Upatnieks juxtaposés, chacun formant une bande verticale ⁹.

Dans les années 1980, de nouvelles méthodes de fabrication permettent de produire des hologrammes par réflexion bon marché à partir de modèles : on peut les reproduire en masse par des techniques d'estampillage. On les retrouve partout, dans la publicité, les magazines et les dispositifs anticontrefaçon appliqués sur les emballages ou les cartes bancaires.

Dès la fin des années 1960, l'holographie a dépassé le cadre scientifique mais, ironiquement, le succès de cette forme d'art décroît dans les années '80 avec l'arrivée des hologrammes produits en masse. Aujourd'hui, l'holographie reste présente dans l'imaginaire collectif mais de façon imprécise et *on qualifie souvent, à tort, d'hologrammes certaines images en trois dimensions, notamment celles de personnes en mouvement qui sont en réalité, pour la plupart, des avatars optiques et/ou électroniques* ¹⁰. ***Bien que moins sous les feux de la rampe, l'holographie est encore bien vivante, simplement recherche et développement se poursuivent plus discrètement aujourd'hui !*** À titre d'exemple, après des années de tâtonnements, et surtout d'absence de résultats probants, en 2010, des physiciens ont réussi à produire des images holographiques animées grâce à un nouveau matériau réinscriptible. Et les résultats ont été améliorés tout récemment ¹¹. *On est enfin passé de la science-fiction à la réalité : des hologrammes se sont animés, certes modestement, mais la télévision holographique est « en marche » !*

Les thèmes évoqués ci-avant sont développés dans une note détaillée, le lecteur intéressé y trouvera les informations souhaitées ⁹.

Les processus photographique, holographique et stéréoscopique

Le processus photographique [Figure 4] établit une relation biunivoque entre les pixels d'une surface photosensible (jadis une émulsion photographique, aujourd'hui de plus en plus souvent un capteur CCD ou CMOS) sur laquelle l'image 2D d'une scène 3D est formée par un objectif en niveaux de gris ou de couleurs. Le volume objet est distribué de part et d'autre du plan objet correspondant au plan image du récepteur, limité en taille par la *profondeur de champ* de l'instrument utilisé. On enregistre donc une distribution 2D d'*éclaircissements* $E(x',y')$ correspondant à une distribution 3D de *luminances* $L(x,y,z)$, improprement appelées « intensités lumineuses »*, émises par chacun des points de la scène imagée. Chaque pixel-image est associé à une zone plus ou moins petite de la scène par les caractéristiques du dispositif imageant.

Hors éventuels traitements physico-chimiques post-éclaircissement (développement et/ou blanchiment), le processus photographique fonctionne en « *un temps* » : l'image de la scène photographiée apparaît directement sur le capteur.

*) L'éclaircissement E est le flux lumineux reçu par unité de surface d'un récepteur, il se mesure en W/m^2 (radiométrie) ou en *lux* (photométrie)

La luminance L est le flux émis par unité de surface d'une source étendue et par unité d'angle solide, dans une direction donnée, elle se mesure en W/m^2sr (radiométrie) ou en *candéla par m²* (photométrie)

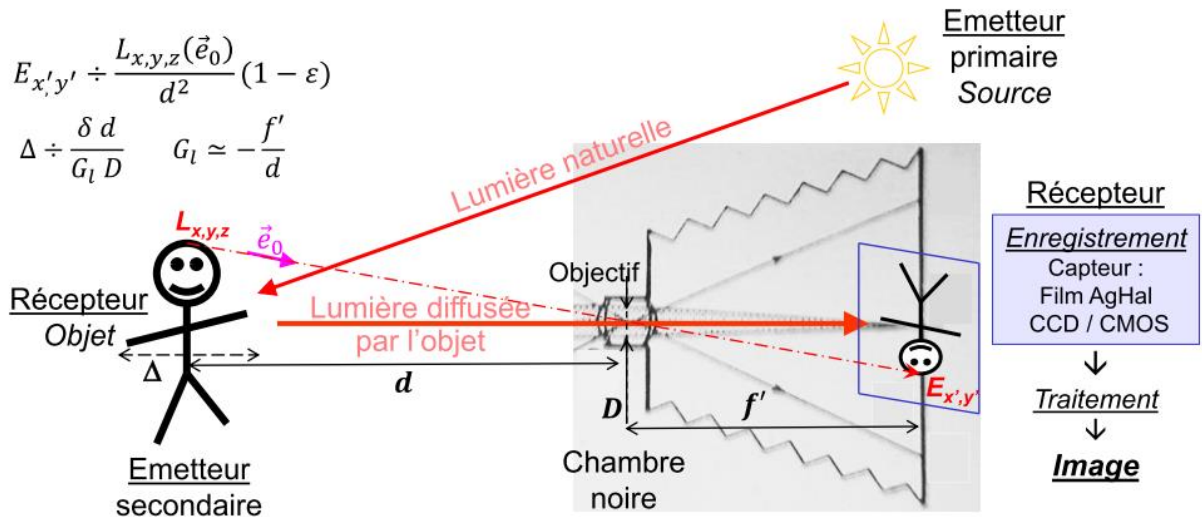
Habituellement la photographie utilise le système photométrique, l'holographie le système radiométrique

9. Yvon Renotte, *Holographie, Hologrammes, Avatars électroniques, ce que l'on ne vous a pas dit . . .*, <https://hdl.handle.net/2268/300493> (2023), 10-13 et 29-38

10. Philippe Gentet and Seung-Hyun Lee, *True holographic ghost illusion*, *Optic Express*, 30 (15), (2022), #465247, 8 pages

11. Pierre-Alexandre Blanche, A. Bablumian, R. Voorakaranam, C. Christenson, W. Lin, T. Gu, D. Flores, P. Wang, W.-Y. Hsieh, M. Kathaperumal, B. Rachwal, O. Siddiqui, J. Thomas, R.A. Norwood, M. Yamamoto, N. Peyghambarian, *Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer*, *Nature* 468 (2010), 80–83 ; P.A. Blanche et al., *Fast and continuous recording of refreshable holographic stereograms*, *Optical Engineering*, 57 (6), 061608 (2018), 6 pages

Figure 4 - **Le processus photographique** : schéma de principe



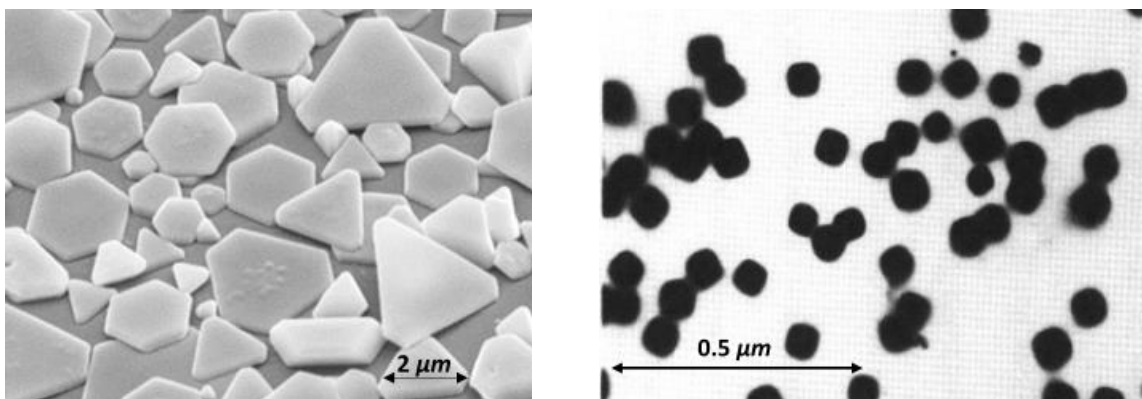
$E_{x',y'}$: éclairement du point « image » (x',y') conjugué du point « objet » (x,y,z) ; $L_{x,y,z}(\vec{e}_0)$: luminance émise par l'élément de surface (x,y,z) dans la direction \vec{e}_0 ; d : distance frontale de l'objet à l'objectif ; ε, G_l, D et f' : facteur de déperdition, grandissement linéaire, diamètre du diaphragme et longueur focale de l'objectif ; δ : taille d'un pixel du capteur photosensible ; Δ : profondeur de champ - en première approximation, elle est proportionnelle à la distance frontale de la scène d , à la taille des pixels δ , et inversement proportionnelle au grandissement linéaire de l'objectif G_l et au diamètre de l'obturateur D . Les photographes savent d'expérience que Δ est d'autant plus grande que la scène est éloignée et que l'instrument est diaphragmé.

En éclairage incohérent, on somme les intensités : la photographie « manipule » des rayons lumineux

! Les couleurs n'ont pas de signification, elles servent simplement d'identificateurs pour « imager » des fonctions ou des actions - Les tailles et distances relatives ne sont pas respectées !

Le processus holographique [Figures 6] établit également une relation biunivoque entre la distribution 3D des luminances $L(x,y,z)$ des points d'une scène 3D et les éclairements $E(x',y',z')$ des points correspondants d'une image 3D (virtuelle ou réelle selon les cas) mais en *deux temps*. Hors éventuels traitements post-exposition, l'hologramme enregistré dans l'épaisseur du matériau photosensible ne donne pas directement une image 3D de la scène holographiée mais une *image codée interférométriquement* par un faisceau de référence. Physiquement, il s'agit d'un réseau diffractif extrêmement complexe qui fournira une image 3D de la scène en « relief vrai » (parallaxe), par décodage à l'aide de la référence appliquée lors de la lecture exactement comme lors de l'enregistrement. L'image holographique est une véritable sculpture de lumière qui « manipule les fronts d'onde », elle n'a pas besoin de lentille(s) !

Figure 5 – **Microphotographies des grains vierges d'émulsions argentiques (AgBr)**

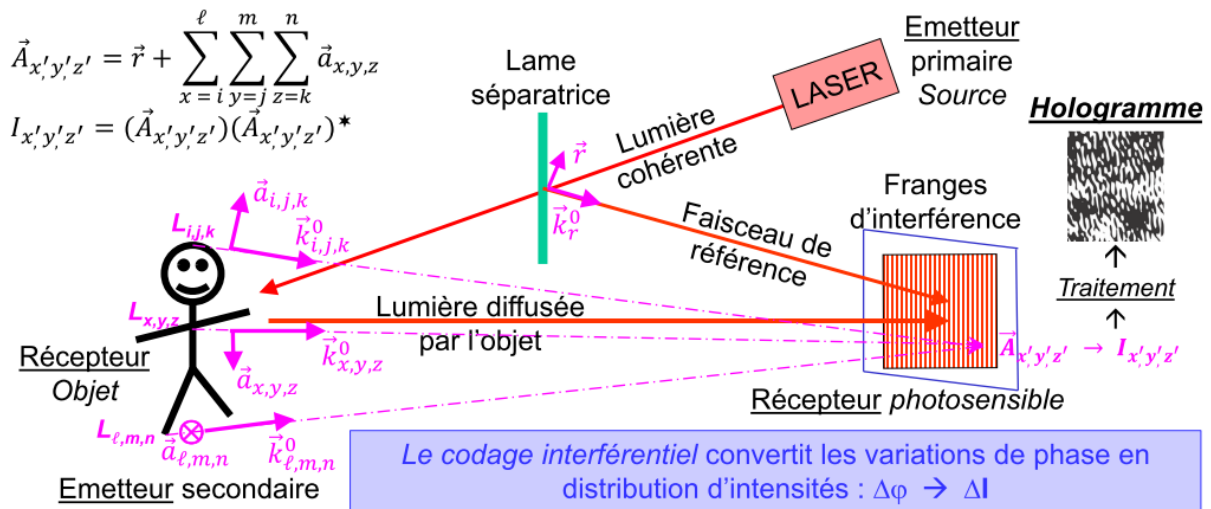


Émulsion commerciale : tablettes triangulaires et hexagonales

Émulsion holographique : micro-grains cubiques

Microphotographies réalisées par la société Agfa-Gevaert n.v. – $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m} = 1$ millionième de mètre

Figure 6.a - Le processus holographique - 1^{re} étape : Codage
Enregistrement - schéma de principe

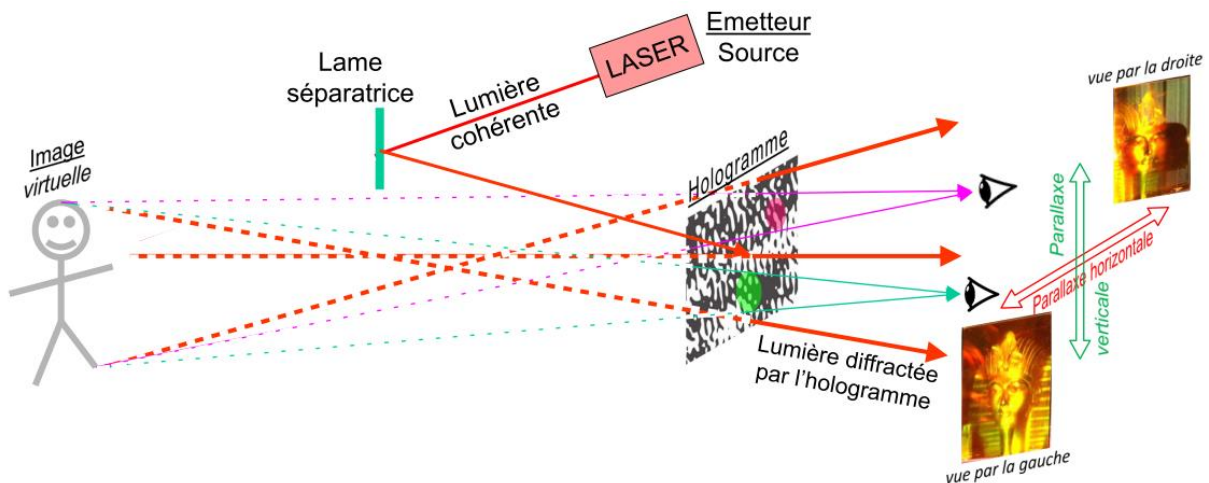


$\vec{A}_{x',y',z'}$: l'amplitude (complexe) résultante au point (x',y',z') est la somme des amplitudes (complexes) $\vec{a}_{x,y,z}$ provenant de tous les points de la scène-objet ; *chacun des pixels* du capteur photosensible reçoit les informations provenant de *tous les points* de la scène - objet et enregistre l'intensité $I_{x',y',z'}$ résultant de l'interférence entre ces signaux et le faisceau de référence $\vec{r} \rightarrow$ l'hologramme est un réseau 3D extrêmement complexe enregistré dans l'épaisseur du matériau (nettement plus petite que les autres dimensions mais non négligeable par rapport à l'interfrange), *illisible* tel que ; les $\vec{k}_{\alpha,\beta,\gamma}^0$ sont les vecteurs d'onde unitaires des différentes radiations ; $(\vec{A}_{x',y',z'})^*$ est le vecteur complexe conjugué de $\vec{A}_{x',y',z'}$

En éclairage cohérent, on somme les amplitudes (complexes) : l'holographie « manipule » des fronts d'onde

! Les couleurs n'ont pas de signification, elles servent simplement d'identificateurs pour « imager » des fonctions ou des actions - Les tailles et distances relatives ne sont pas respectées !

Figure 6.b - Le processus holographique - 2^e étape : Décodage
Lecture de l'hologramme par le faisceau de référence - schéma de principe



Le montage représenté est celui d'un hologramme par *transmission* : seule l'image virtuelle est représentée, elle se forme à l'endroit exact où se trouvait l'objet lors de l'enregistrement - La lecture se fait en éclairage cohérent

L'image virtuelle est **orthoscopique** (relief identique à celui de l'objet), l'image réelle est **pseudoscopique** (relief inversé par rapport à celui de l'objet)

Le point commun avec la photographie se limite quasiment à l'utilisation d'un même matériau d'enregistrement dans les premiers temps de l'holographie, des émulsions argentiques AgHal (aux halogénures d'argent) [Figure 5] ¹². On notera toutefois que les émulsions utilisées en photographie ont des

12. Pierre Glafkidès, *Chimie et physique photographiques*, éd. Paul Montel, 4^e éd (1976), 21-51 et 377-418
Yvon Renotte, *De la primitivité des émulsions photographiques. Effets d'un lavage et d'un séchage*, Acad. Roy. Sci. Belgique, Bulletin de la Classe des sciences, 68 (1982), 699-714

caractéristiques très différentes de celles intervenant en holographie. La taille et la forme des microcristaux, *les grains*, déterminent ces caractéristiques (sensibilité, vitesse, définition, . . .). Les premières sont généralement constituées de plaquettes hexagonales micrométriques ($\varnothing >$ plusieurs μm) avec un pouvoir couvrant élevé. Elles ne peuvent pas être utilisées en holographie. Cette technique requière l'usage d'émulsions spécifiques, à *grains ultra-fins* ($\varnothing = 35$ à $90 nm$)** uniformément distribués dans le volume du substrat gélatine. L'émulsion holographique est ainsi relativement transparente sous éclairage inactinique (par exemple éclairage vert pour les émulsions sensibilisées à la lumière rouge ou l'inverse).

**) $1 nm = 10^{-9} m = 1$ milliardième de mètre

L'éclairage d'une plage en lumière cohérente s'accompagne d'un phénomène visuel particulier : l'impression d'une texture granuleuse qui se déplace lorsque l'œil se déplace. C'est la *granularité LASER*, appelée *speckle* en Anglais¹³. Cette granulation résulte des interférences (aléatoirement constructives et destructives) survenant à l'échelle submicroscopique en raison des irrégularités de la surface inévitables à cette échelle, même si celle-ci paraît « lisse et régulière » à l'échelle macroscopique. Initialement considéré comme « parasite », les holographistes ont d'abord tenté de le supprimer, ou du moins le minimiser, par exemple en multipliant le nombre des enregistrements de la scène sous des directions d'éclairage différentes, chacun des hologrammes de la même scène ayant son speckle propre, différent de celui des autres, les effets cumulés finiront par se contrecarrer.

On observera plus tard que le speckle peut jouer un rôle important en métrologie ce qui donnera naissance aux techniques d'*ESPI* (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*) et de *DESPI* (*Digital ESPI*)^{13,14}.

La stéréoscopie est à la fois la technique d'imagerie 3D la plus « proche » de la photographie et celle qui exploite un des moyens dont la Nature a doté les êtres vivants, du moins le règne animal, pour la percevoir : *la vision binoculaire*. Notons que contrairement à une croyance fort répandue, cette dernière n'est pas le seul moyen dont nous disposons pour apprécier la profondeur de champ, nous pouvons également utiliser la différence de déplacement apparent des objets proches et des objets lointains pendant les petits mouvements de l'observateur : ce qui est lointain « bouge » lentement, ce qui est proche « traverse le champ d'observation ».

13. Pierre Lena et Alain Blanchard, *Lumières, une introduction aux phénomènes optiques*, InterEditions (1990), 160-162 ; P. Hariharan, *Basics of Holography*, Cambridge University Press (2002), 21-23 et 141-143

14. Paul Smigielski, *Holographie industrielle*, Teknea – Toulouse (1994), 304-310

Yvon Renotte, Dimitri Laboury, Bernard Tilkens, Vincent Moreau, *Au croisement de la Physique et de l'Archéologie: le projet OSIRIS (Optical Systems for Interferometric Relief Investigation and Scanning), Projet de développement d'un système de relevé numérique des documents archéologiques et épigraphiques en trois dimensions par des procédés optoélectroniques*, Science et Culture, 390 (2004), 74-80 ; <http://hdl.handle.net/2268/259746>

Pierre Slangen, *Application de la granularité laser à la métrologie des microdéplacements*, thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Physiques, Université de Liège (03-07-1995) ; Jean-Michel Mestrez, *Profilométrie par interférométrie conoscopique*, thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Physiques, Université de Liège (28-03-1997) ; Christophe De Veuster, *Amélioration d'un interféromètre à granularité Laser pour la mesure de vibrations, de surfaces et de défauts*, thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Physiques, Université de Liège (20-02-1998) ; Vanessa Rosso, *Conception et réalisation d'un dispositif interférométrique de shearographie. Application en milieu diffusant*, thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Physiques, Université de Liège (10-12-2007) ; Fabrice Michel, *Métrologie optique : développements pour la shearographie et extrapolation à la projection de franges*, thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Physiques, Université de Liège (12-09-2011) ; Pierre Slangen, *Contribution de l'Optique Appliquée à la Mécanique et aux Sciences des risques*, Mémoire présenté pour obtenir l'habilitation à diriger des recherches, soutenu à l'Ecole des Mines d'Alès – Université Jean Monnet, Saint-Étienne (France) (14-06-2013) ; Pascal Blain, *Éléments optiques biréfringents pour interféromètre à chemins optiques quasi-communs*, thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Physiques, Université de Liège (17-03-2014)

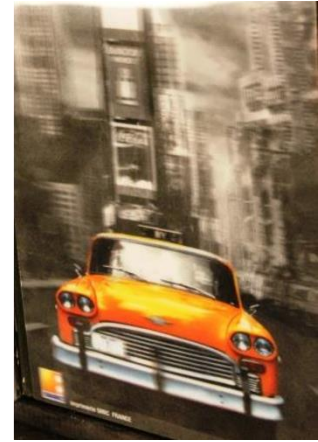
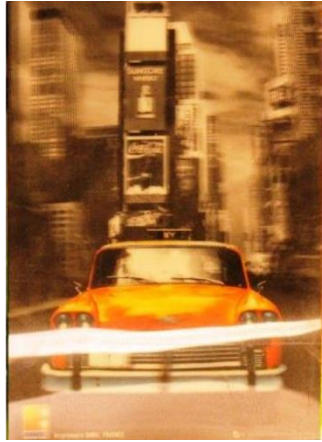
Figure 7 – Stéréoscopie vs Holographie : perspective

Photo par la droite

Photo de face

Photo par la gauche

Stéréogramme : réseau lenticulaire – type Bonnet → la perspective est figée



Hologramme de réflexion – AgHal type Denisjuk → la perspective est parfaitement reproduite

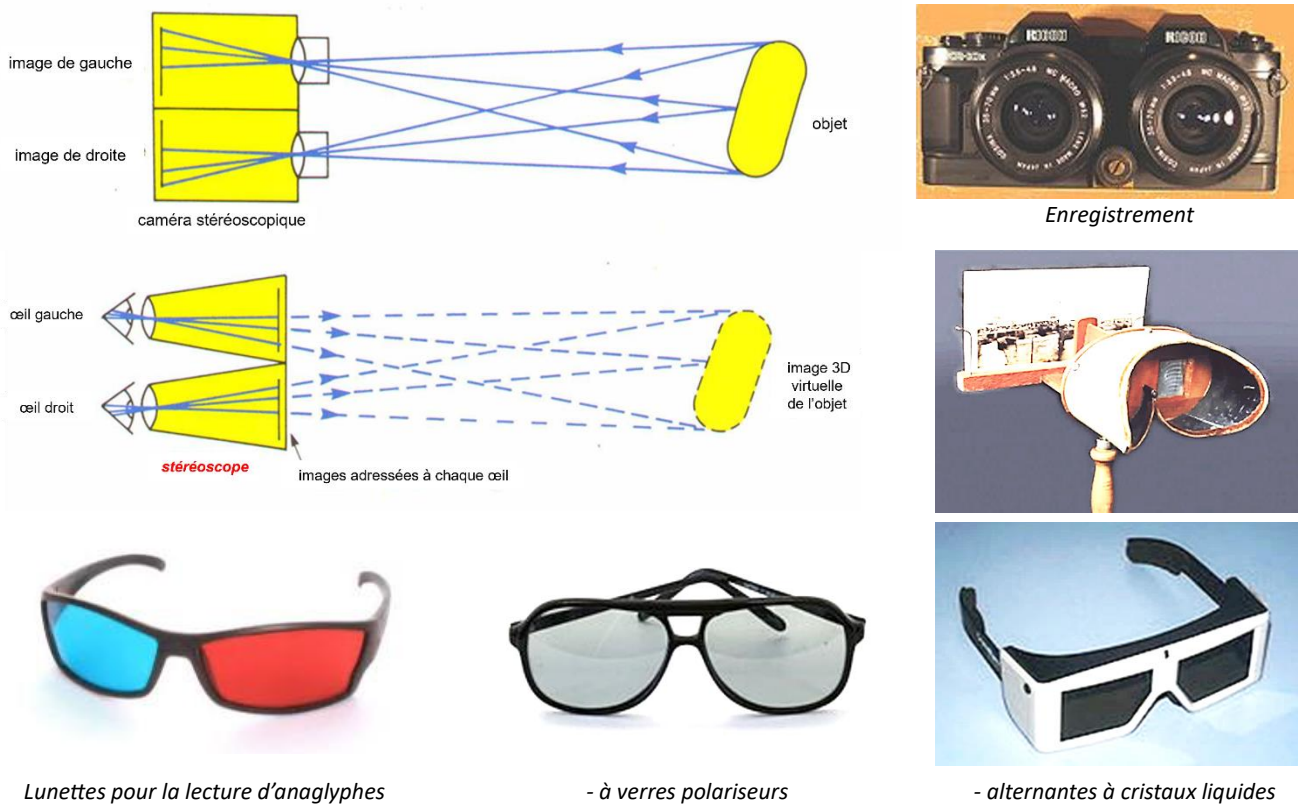


Contrairement à l'holographie, la stéréoscopie produit un « relief figé » [Figure 7]¹⁵, sans possibilité de modifier la parallaxe (horizontale et verticale) fixée par la géométrie de l'ensemble « scène – dispositif d'enregistrement », lors de cette opération. Un observateur peut se déplacer parallèlement au plan de la scène enregistrée sans que la perspective n'évolue. Cette situation est tout-à-fait normale puisque le processus stéréoscopique consiste à enregistrer deux images photographiques légèrement décalées d'une même scène et à les adresser séparément à chacun des yeux à l'aide d'un dispositif ad hoc. Le cerveau fait le reste ! Plusieurs procédés de séparation ont été inventés : des plus simples : deux trous percés dans une feuille de carton munis ou non de lentilles, aux plus complexes : les anaglyphes qui utilisent deux couleurs différentes, les lunettes polarisées des états de polarisation croisés, éventuellement dynamiques, synchronisés à des cristaux liquides alternativement passants ou non. Bien qu'efficaces, chacun présente des défauts et/ou contraintes qui en ont limité l'exploitation. D'une manière générale, l'usage d'un « appareil » de lecture tel des lunettes à verres colorés ou polariseurs, voire la nécessité de simplement forcer une adaptation oculaire, peut entraîner une certaine fatigue lorsque la séance de lecture se prolonge. On conçoit aisément que les anaglyphes soient peu compatibles avec

15. Yvon Renotte, *Holographie, Hologrammes et (quelques) Applications*, in in « *Lumière, réflexion, application, émotion* » (ouvrage collectif), éd. Embarcadère du Savoir, Maison de la Science – Liège (2015) 64-77 , <http://hdl.handle.net/2268/258674> ; *Hologrammes, Avatars électroniques, ce que l'on ne vous a pas dit . . .* , <https://hdl.handle.net/2268/300493> (2023), 21-26 ; *De la lumière pour tous : de la luminothérapie à l'égyptologie*, in « *Un Bain d'Ondes Électromagnétiques* », Journée d'études scientifiques – Société Libre 'Emulation', Liège, 18 novembre 2015 , <http://hdl.handle.net/2268/258743>

l'imagerie 3D en couleurs et que l'usage de polariseurs incolores a apporté une amélioration incontestable. Toutefois, même les techniques modernes les plus performantes, les dispositifs à lunettes alternantes à cristaux liquides, engendrent, à la longue, des effets de papillotement pouvant s'avérer désagréables.

Figure 8 – La stéréoscopie : enregistrement – lecture



Lunettes pour la lecture d'anaglyphes

- à verres polariseurs

- alternantes à cristaux liquides

Il est néanmoins incontestable que la technique a rencontré un énorme succès d'audience auprès du grand public, notamment en cinématographie, y compris les films en images de synthèse (cf. les nombreuses réalisations des studios d'animation PIXAR¹⁶ repris par le consortium Disney). Elle a même connu des adaptations surprenantes à l'émergence des media les plus récents telle la synthèse du View-Master® à disques des années '40 et du smartphone¹⁵. Assez aisément numérisable, la stéréoscopie est utilisée pour la numérisation en 3D dans de nombreux domaines de l'art (sauvegarde d'objets rares et reconstitution de sites disparus et/ou en péril), de l'enseignement et de l'industrie, notamment en R&D. Aujourd'hui, outre l'industrie du jeu, elle est de plus en plus souvent associée à l'intelligence artificielle à laquelle elle apporte un support exceptionnellement interactif et réaliste. En télévision, le succès fut nettement plus mitigé malgré quelques tentatives spectaculaires, soutenues à grands renforts de publicité¹⁵.

La stéréoscopie est née au 19^e siècle, peu après la photographie bien que des traces plus anciennes existent (13^e siècle, Oxford)¹⁷. Nous avons évoqué les nombreux moyens de séparation des images inventés auxquelles j'ajouterai les techniques d'images imbriquées, les réseaux lenticulaires, de la photographie intégrale de Lippmann (1908) à l'auto-stéréoscopie de Bonnet dans les années 1940 à 60, qui permettent l'observation directe du relief, sans instrument ni lunettes spéciales [Figure 10]¹⁵. Cette dernière méthode est particulièrement impressionnante et sans doute la plus proche de l'holographie.

16. https://fr.wikipedia.org/wiki/Pixar_Animation_Studios

17. Olivier Cahen, *L'image en relief : De la photographie stéréoscopique à la vidéo3D*, éd Masson (1990)

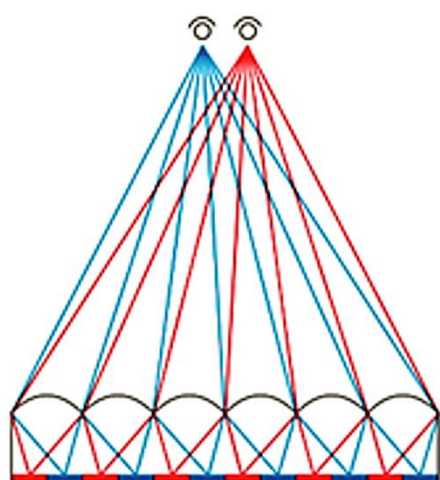
Figure 9 – Ils ont inventé la stéréoscopie



*) Prix Nobel de physique 1908

Elle est difficilement transposable en cinématographie mais bien en télévision : des écrans lenticulaires ont été montrés dans plusieurs foires et expositions, sans vraiment « percer » auprès du grand public. Quelques sociétés ont essayé de l'introduire en photographie sans grand succès malgré des images 3D fort acceptables [3D Magic™, USA - California]. La technique, peut-être trop complexe à mettre en œuvre, donc trop onéreuse, n'a pas déclenché auprès du public le « plus attendu » qui aurait fait « décoller » une commercialisation à grande échelle : elle est restée au stade de gadget ! Il faut dire qu'elle nécessitait l'usage d'un appareil spécifique, muni de trois objectifs [3D Wizard / ImageTech™]¹⁸, utilisant des films argentiques 24x36 standards mais qui devaient être traités par des laboratoires agréés, peu nombreux en Europe, capables de fournir les images lenticulaires correctes.

Figure 10 – Systèmes lenticulaires



Images multivues imbriquées, disposées en ligne derrière un réseau lenticulaire



Maurice Bonnet derrière son filtre - réseaux lenticulaires, surfaces gaufrées

Les différents types d'hologrammes

La géométrie, le matériau et les traitements post-exposition qu'il subira, vont déterminer les caractéristiques finales des hologrammes qui pourront être très différentes d'une catégorie à l'une. Nous allons tenter de préciser les divers effets en fonction des paramètres précédents et de quelques autres critères. La qualité des hologrammes sera appréciée par le **rendement diffractif** de l'hologramme η qui est le rapport du flux lumineux du premier ordre diffracté « +1 » à celui du faisceau incident. Certains utilisateurs appellent cette notion « efficacité » et mesurent parfois le rapport du flux total diffracté

18. Serge Habraken, *Fonctionnement de l'appareil photo 3D Magic™ - images lenticulaires*, thèse annexe présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Physiques, Université de Liège (09-10-1995)

(dans tous les ordres intervenants) au flux incident. En pratique, il est donc utile / nécessaire de préciser la signification exacte de la grandeur effectivement considérée dans le cas traité.

Afin de ne pas allonger le texte et compte tenu du principe « qu'un schéma explicite en dit souvent plus qu'une longue description », je vais m'en tenir à ce dicton en « imageant le plus possible » les concepts que je souhaite introduire.

La géométrie

Figure 11.a – Hologrammes par transmission : enregistrement

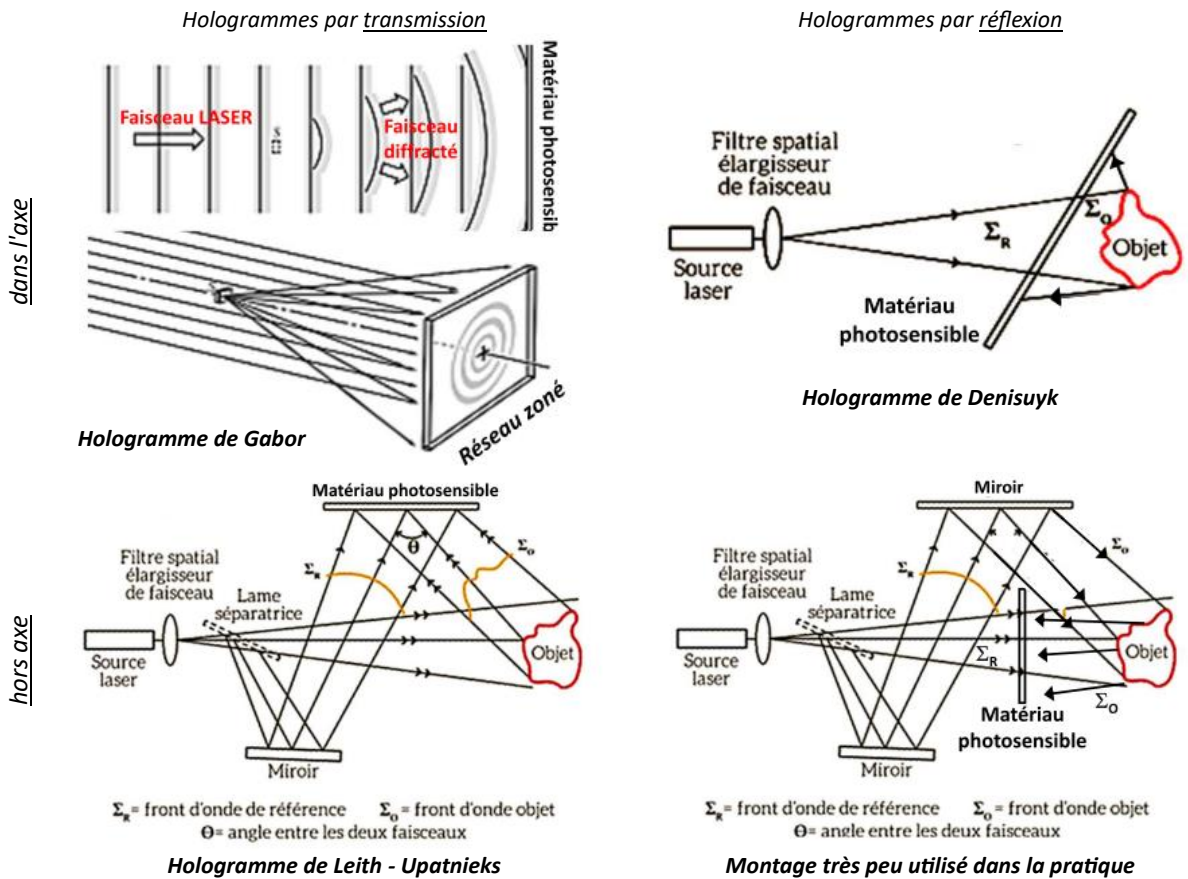
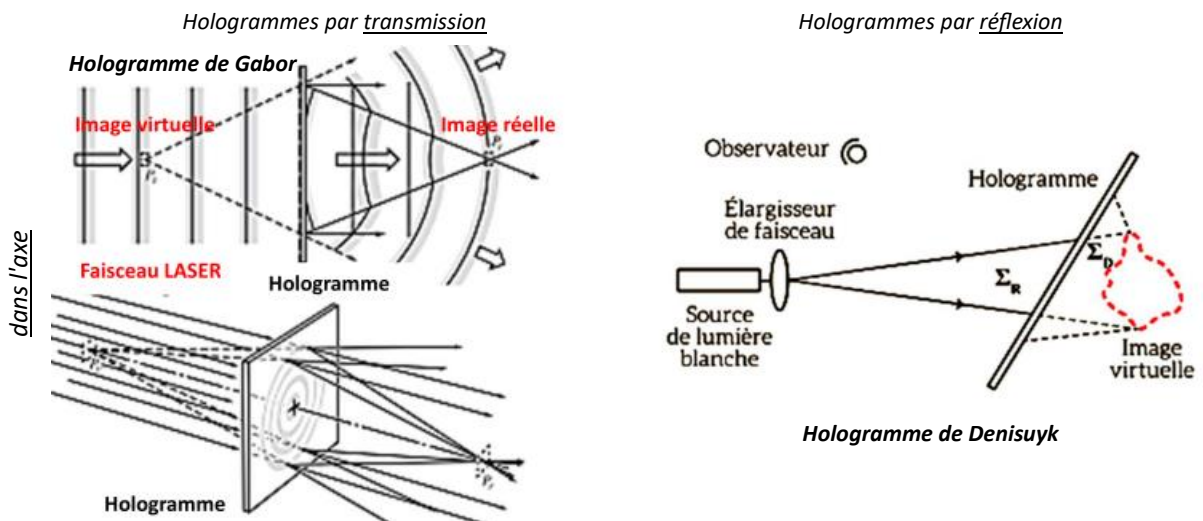
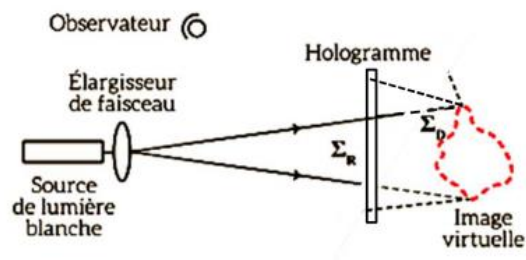
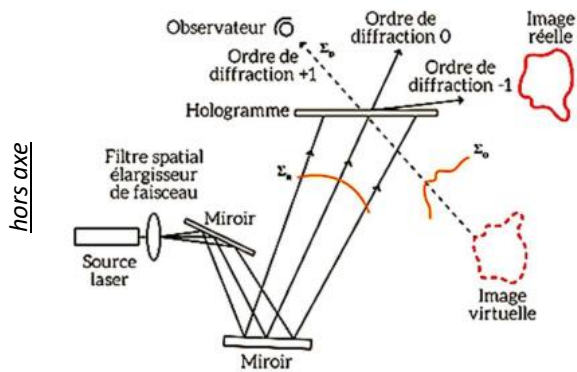


Figure 11.b – Hologrammes par transmission : reconstruction

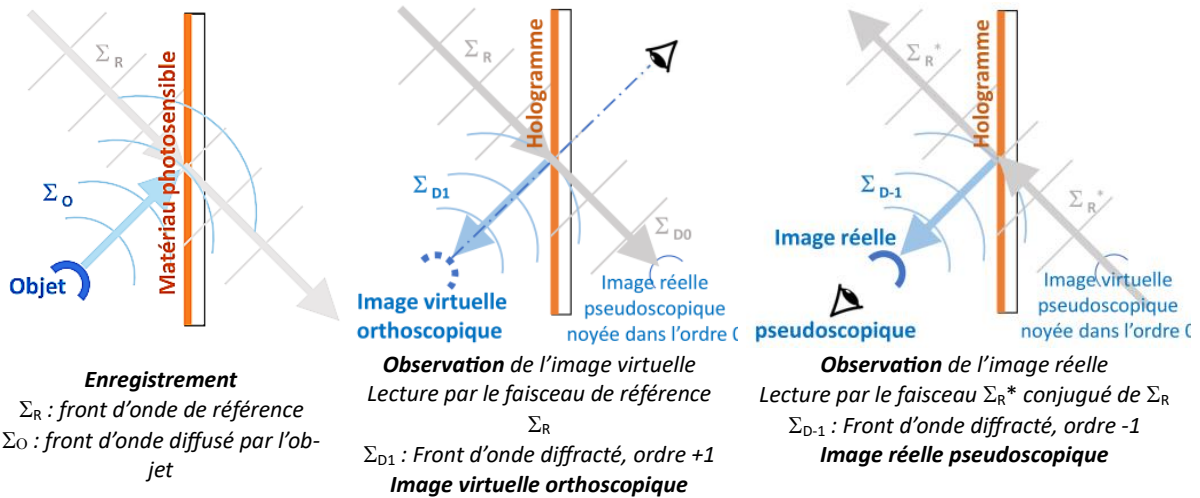




Σ_R : Front d'onde de référence
 Σ_O : Front d'onde diffracté (ordre +1) : vision de l'image virtuelle
Hologramme de Leith – Upatnieks

Montage très peu utilisé dans la pratique

Figure 11.c – Hologrammes par transmission : Images virtuelle et réelle



Commentaires¹⁹

En l'absence de décodage, les *hologrammes* sont *illisibles* [Figure 12]. Ils apparaissent comme un système de franges plus ou moins claires et plus ou moins sombres imbriquées dans l'épaisseur du matériau d'enregistrement dans lequel elles constituent un réseau 3D complexe.

Figure 12 - Hologramme agrandi 2400 fois



Hologramme d'amplitude par transmission
 © Alain Debay, Club Athena - asbl ICARE, Charleroi

Les différents schémas montrent l'existence simultanée d'une image virtuelle et d'une image réelle. La première est *orthoscopique*, géométriquement identique à l'objet holographié, tandis que la seconde est *pseudoscopique*, sa perspective est inversée. Notons que l'œil ne perçoit pas « directement » ce processus d'inversion de l'image 3D, elle sera d'ailleurs utilisée comme « objet » pour produire des *hologrammes de seconde génération*¹⁹ à condition qu'elle ne soit pas « noyée » dans l'ordre zéro (prolongation du faisceau de référence dans « l'espace image ») [Figures 13].

Il est utile de respecter quelques règles pour obtenir de « bons hologrammes » (η élevé) : en pratique, lors de l'enregistrement

19. Yvon Renotte, ; *Holographie, Hologrammes, Avatars électroniques, ce que l'on ne vous a pas dit . . .*, <https://hdl.handle.net/2268/300493> (2023), 6-9 et 15-17

- le montage doit être mécaniquement très stable pour éviter des déplacements susceptibles de brouiller le système de franges d'interférence pendant l'opération, donc inférieurs à l'interfrange
- la différence entre les chemins optiques « référence » (Figure 6.a : distance lame séparatrice – matériau photosensible) et « objet » (distance lame séparatrice – objet + objet – matériau photosensible) doit être nettement inférieure à la longueur de cohérence du LASER utilisé lors de l'enregistrement
- en raison des « bruits parasites » inévitables, les meilleurs résultats sont obtenus pour un rapport de l'ordre de 2:1 entre les « intensités » des faisceaux de référence et objet pour les hologrammes par réflexion, de l'ordre de 5:1 pour ceux par transmission
- il importe d'éviter les réflexions accidentelles qui peuvent modifier les états de polarisations des faisceaux et réduire la qualité des hologrammes

Figure 13.a – Hologrammes par réflexion : Images virtuelle et réelle

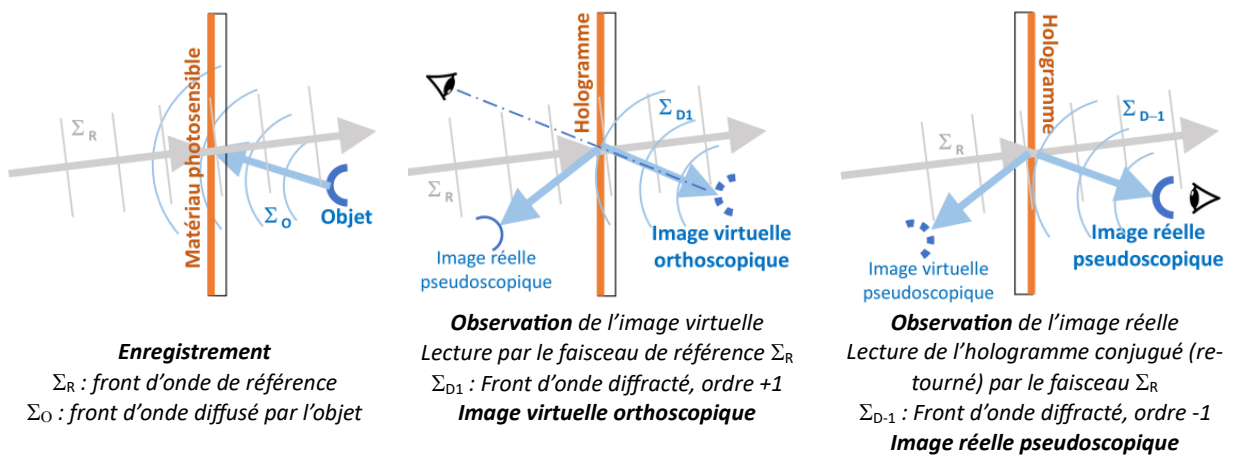
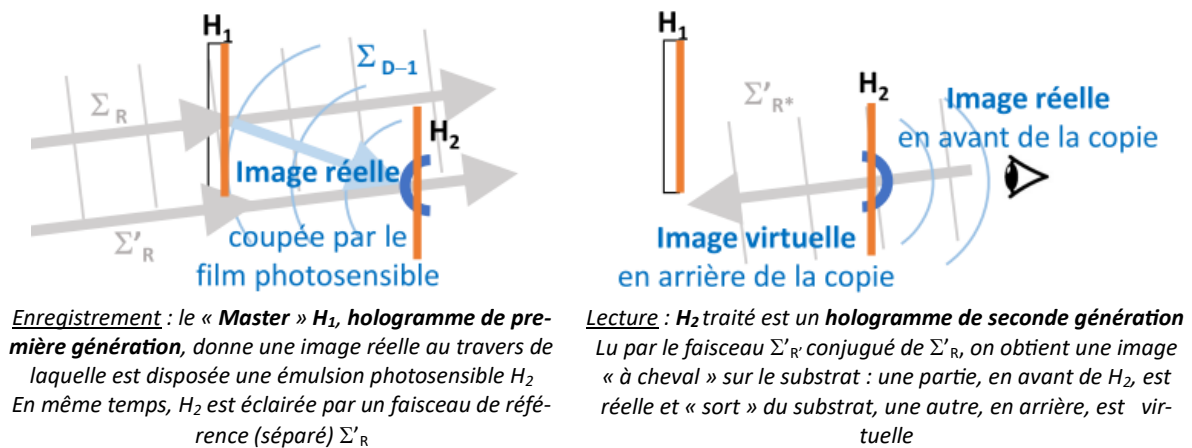


Figure 13.b – Hologrammes de seconde génération



Le matériau d'enregistrement

Outre la géométrie d'enregistrement / lecture, d'autres paramètres permettent de catégoriser les hologrammes. Le matériau d'enregistrement et son traitement post-exposition éventuel déterminent comment l'hologramme « module » le faisceau de lecture Σ_R : celui-ci étant cohérent, soit il agit sur la transmission et module l'amplitude, soit il est totalement transparent dans le visible et agit sur la phase via des micro-variations locales de l'indice de réfraction ou via un microrelief de surface. Dans le premier cas, on a affaire à des **hologrammes d'amplitude**, dans le second à des **hologrammes de phase**. D'une manière générale, le rendement de diffraction des derniers est supérieur à celui des

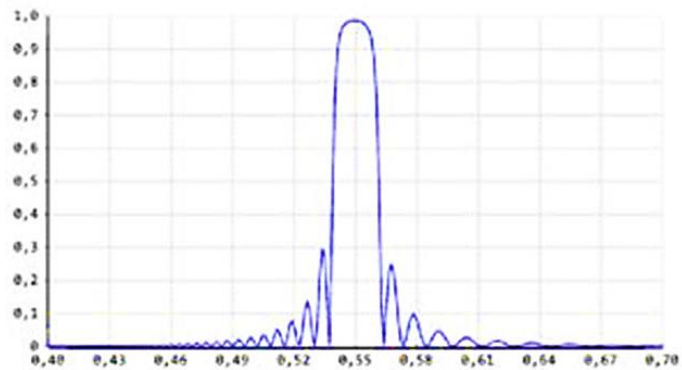
premiers. Tous les types d'hologrammes décrits au paragraphe précédent peuvent être de phase ou d'amplitude ¹⁹.

Sauf traitement particulier, les *émulsions argentiques* donnent des *hologrammes d'amplitude*. Si elles sont « *blanchies* », c'est-à-dire si un post-traitement transformant les grains d'argent en un sel d'argent transparent est appliqué après le développement, on obtient des *hologrammes de phase*. La *gélatine bichromatée* et les *photopolymères* fournissent directement des *hologrammes de phase* ¹⁹.

Physiquement, les hologrammes sont des réseaux et ils se comportent comme tels, plusieurs paramètres sont « liés » : angles d'incidence et de diffraction, pas du réseau, indice de réfraction et longueur d'onde. On les classe en deux familles en fonction du rapport entre l'épaisseur d du matériau photosensible et l'interfrange moyen (période spatiale) Λ du réseau y inscrit. Il est dit « **en volume** » (ou *épais*) lorsque d est nettement supérieur à Λ et « **mince** » dans la situation opposée ($d \ll \Lambda$). Dans le premier cas, *le régime de diffraction est celui de Bragg* : les hologrammes sont très sélectifs spectralement et angulairement [Figure 14]. Dans l'autre cas, l'hologramme est dit « *en surface* » (ou mince) : *le régime de diffraction est celui de Raman-Nath*, analogue à celui d'un réseau de diffraction « classique » [Figure 15], lu en lumière blanche, plusieurs ordres peuvent être observés en même

temps que la décomposition spectrale. La distinction entre les deux régimes a été étudiée par plusieurs auteurs sans qu'une réelle unanimité ressorte. Initialement, elle était basée sur le paramètre $Q = 2\pi\lambda_0 d / n_0 \Lambda^2$ [$Q < 1$: l'hologramme est en surface, $Q > 1$: il est en volume ; n_0 est la valeur de l'indice hors modulation et λ_0 la longueur d'onde d'enregistrement] utilisé dans un premier modèle proposé par Kogelnik ²⁰, complété ultérieurement par Moharam et Gaylord ²¹ qui ajoutèrent un régime intermédiaire. [cf. Annexes : Tableau 1]

Figure 14 – Hologramme en volume : sélectivité spectrale



Hologramme par réflexion : variation du rendement de diffraction η autour de la longueur d'onde de reconstruction $0,55 \mu\text{m}$

Par « nature », les hologrammes par réflexion sont « en volume » : éclairés en lumière blanche, ils se comportent en filtre chromatique et sélectionnent *leur couleur* (longueur d'onde) de lecture. Théoriquement, elle devrait être identique à celle du LASER utilisé lors de l'enregistrement mais en pratique, les traitements post-exposition entraînent souvent des rétreints du matériau photosensible provoquant un rapprochement des franges d'interférence enregistrées, donc une diminution de la longueur d'onde restituée : par exemple, un hologramme enregistré dans le rouge (LASER HeNe) lu en lumière blanche apparaîtra jaune ou verdâtre [Figures 7]. Des processus de « regonflement » peuvent être appliqués pour rétablir la « bonne couleur » si nécessaire ³.

La pixellisation (taille des microcristaux des émulsions AgHal, des micelles de la gélatine bichromatée et des photopolymères) et/ou d'autres propriétés du matériau photosensible entraîne(nt) une *limitation de la résolution* souvent exprimée en $\ell p/mm$ (trois à six mille paires de traits par millimètre), associée à l'inverse de l'interfrange / pas du réseau $\Lambda = \lambda_0 / 2 n_0 \sin(\theta/2)$, λ_0 étant la longueur d'onde

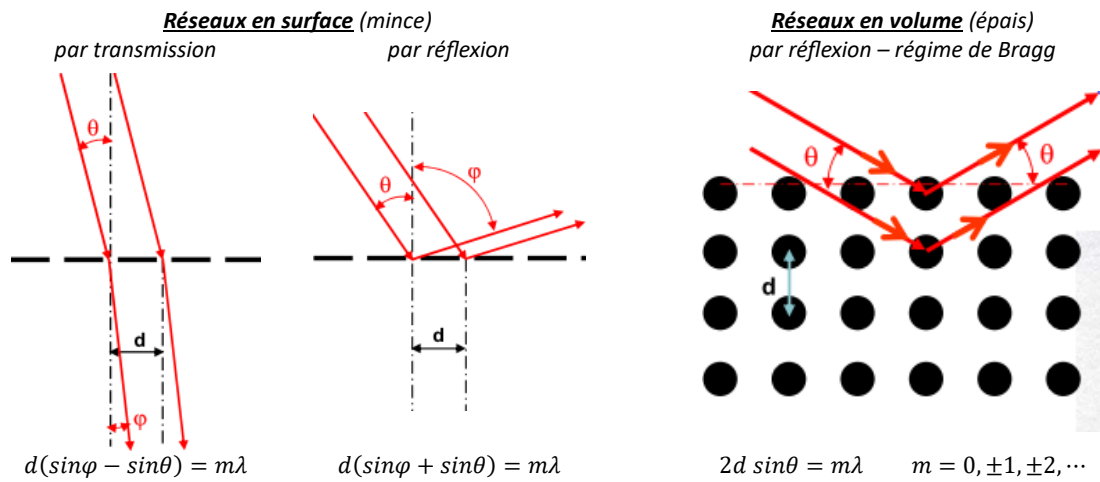
20. Herwig Kogelnik, *Reconstructing response and efficiency of hologram gratings*, Proceedings of the Symposium on Modern Optics, Brooklyn : Polytechnic Press (1967), 605-617 ; *Coupled wave theory for thick hologram gratings*, Bell System Technical Journal (1969), 2909-2947

21. M. Gamal Moharam and Thomas K. Gaylord, *Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction*, Journal of Optical Society of America, 71 (1981), 811-818 ; M. Gamal Moharam, Thomas K. Gaylord and Robert Magnusson, *Criteria for Bragg regime diffraction by phase gratings*, Optics Communications, 32 (1980), 19-23 ; *Criteria for Raman-Nath regime diffraction by phase gratings*, Optics Communications, 32 (1980), 14-18

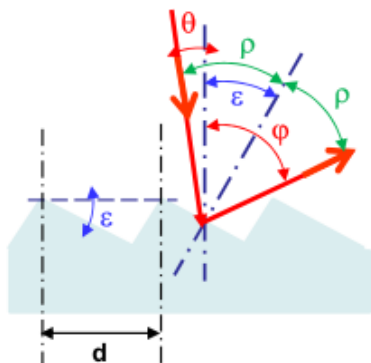
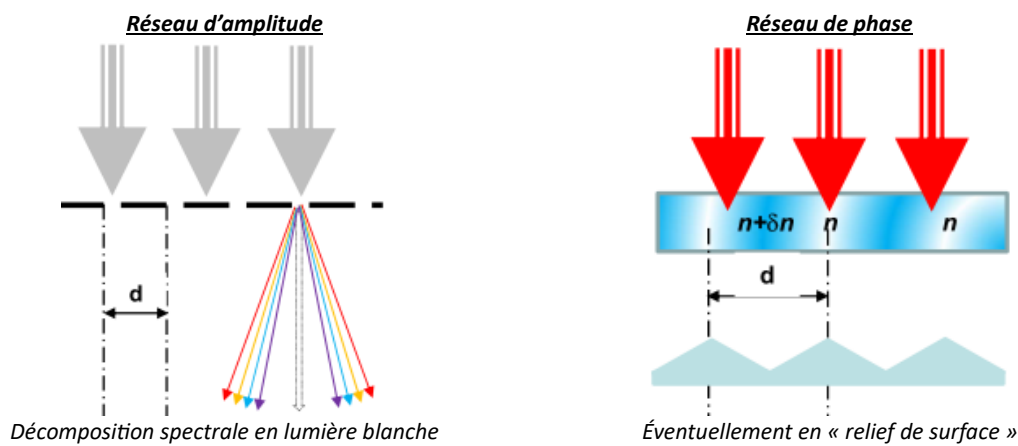
d'enregistrement, n_0 l'indice de réfraction « hors modulation » du matériau et θ l'angle entre les faisceaux de référence et objet « moyens ». Il en résulte une contrainte sur la valeur de cet angle²² [Figure 16].

Résumé

Figure 15 – À chaque réseau « son » hologramme



En holographie : les ordres supérieurs à ± 1 sont éteints ou fortement atténués



Les réseaux plans, par transmission ou par réflexion, diffractent le maximum d'intensité dans l'ordre 0 où il n'y a pas de dispersion, ce qui n'est pas intéressant. Les **réseaux blazés** (resplendissants de couleur) ou **réseaux-échelle**, sont des réseaux non-plans, par réflexion, qui permettent de diffracter une forte proportion de la lumière dans un ordre non-nul qu'on peut fixer avec une grande précision (environ 70%).

Ils sont très couramment utilisés en instrumentation astrophysique²³.

$$\text{si } \theta = \varphi : 2d \sin(\varepsilon) = m\lambda$$

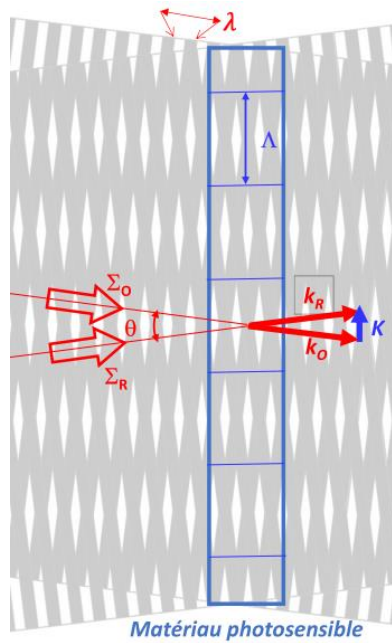
$$\text{si } \theta = 0 : \varphi = \theta + 2\varepsilon \text{ et } d \sin(2\varepsilon) = m\lambda$$

22. Hans I. Bjelkhagen, *Silver-Halide Recording Materials for Holography and their Processing*, Springer-Verlag – Series in Optical Sciences, Vol.66 (1993), 19-33 ; P. Hariharan, *Basics of Holography*, Cambridge University Press (2002), 27-37
23. Bernard Sabushimike, *Conception et modélisation des réseaux de diffraction pour imageur hyperspectral miniature dans le domaine du visible à l'infrarouge moyen*, thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Physiques, Université de Liège (09-2020)
- Georges Horugavye, *Correction d'aberrations de spectromètres à l'aide de réseaux holographiques enregistrés sur des surfaces non planes : études théorique et expérimentale*, thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Physiques, Université de Liège (08-03-2023)

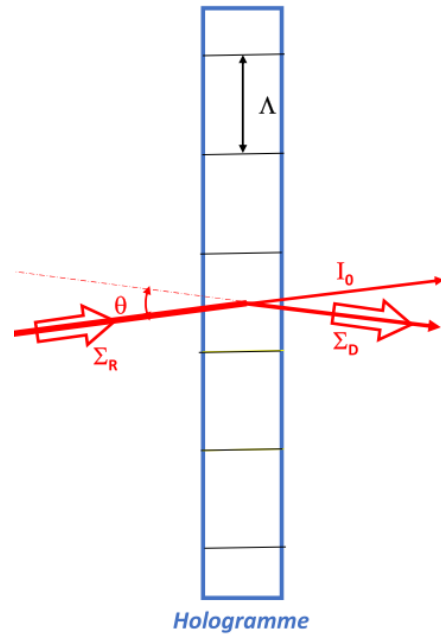
Figure 16 – Hologrammes épais

Par transmission

Enregistrement (codage interférométrique)

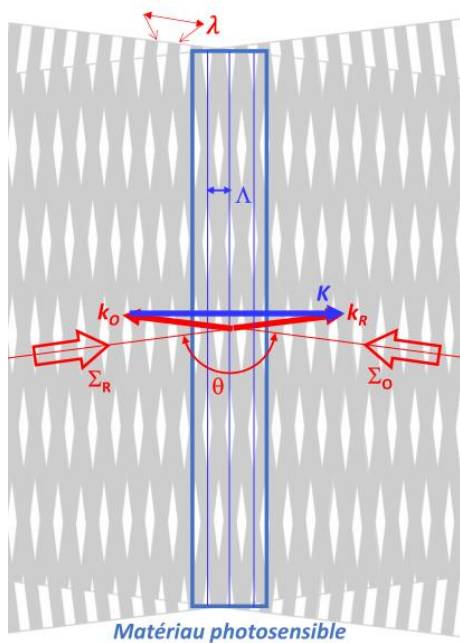


Lecture (décodage)

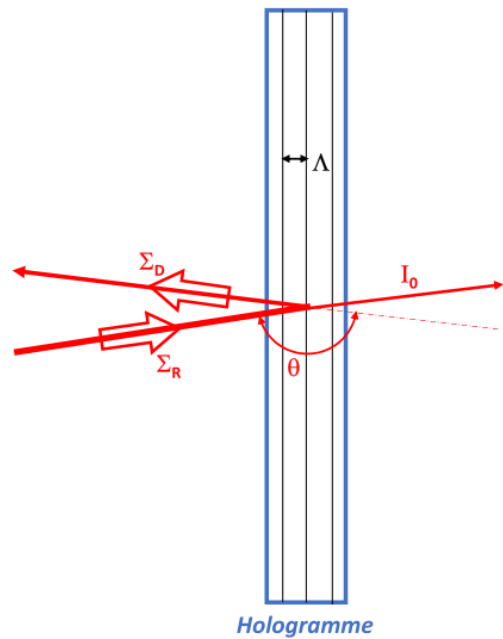


Par réflexion

Enregistrement (codage interférométrique)



Lecture (décodage)



Σ_R : front d'onde de référence ; Σ_O : front d'onde objet à l'enregistrement ; Σ_D : front d'onde diffracté à la lecture ; θ : angle entre Σ_R et Σ_O ; I_0 : ordre zéro diffracté ; k_O et k_R : modules des vecteurs d'onde objet et de référence ; λ : longueur d'onde ; K : module du vecteur réseau ; Λ : interfrange interférentiel = période spatiale du réseau (compte non-tenu de l'indice n du matériau photosensible dans le schéma)

$$k_O = k_R = \frac{2\pi}{\lambda} ; K = \frac{2\pi}{\Lambda} ; \Lambda = \frac{\lambda}{2n \sin(\theta/2)}$$

Tableau 1 – Les divers types d’hogrammes : synthèse

- Géométrie utilisée au montage	« dans l’axe »	« hors axe »
- par transmission	Gabor (1947)	Leith – Upatnieks (1962)
- par réflexion	Denisyuk (1963)	
- de seconde génération		
- « arc-en-ciel »	Benton (1969)	

- Matériaux photosensibles utilisés pour l’enregistrement et traitements		
- par modulation d’amplitude	émulsion photographique + développement « normal »	
- par modulation de phase	- modulation de l’indice de réfraction	émulsion photographique + blanchiment gélatine bichromatée certains photopolymères cristaux photoréfractifs
	- modulation de l’état de surface	certains photopolymères photorésists
- mixtes	certains photopolymères	

- Caractéristiques		
- rendement de diffraction	$\eta = I_D / I_0$	I_0 : intensité du faisceau incident I_D : intensité du faisceau diffracté dans l’ordre 1
- épaisseur	$Q = 2\pi\lambda d / n\Lambda^2$ $\Lambda = \lambda / 2n \sin(\theta/2)$	$Q > 1$: hologramme « en volume » $Q < 1$: hologramme « mince »

Type	<i>transmission « mince »</i>		<i>transmission « en volume »</i>		<i>réflexion « en volume »</i>	
	<i>amplitude</i>	<i>phase</i>	<i>amplitude</i>	<i>phase</i>	<i>amplitude</i>	<i>phase</i>
η (théorique) ²⁴	10%	40%	5%	100%	15%	100%

24. Hans I. Bjelkhagen, *Silver-Halide Recording Materials for Holography and their Processing*, Springer-Verlag – Series in Optical Sciences, Vol.66 (1993), 66-73 ; P. Hariharan, *Basics of Holography*, Cambridge University Press (2002), 27-37