

## Holographie

## Imagerie



## Hologrammes

1<sup>re</sup> partie

**Yvon Renotte**, Dr Sci., enseignant-chercheur honoraire de l'Université de Liège

Past-prof invité, co-fondateur du HOLOLAB, Dépt AGO (Astrophysique, Géophysique et Océanographie)

[y.renotte@uliege.be](mailto:y.renotte@uliege.be) – <https://orbi.uliege.be/profile?uid=p041181> - [www.linkedin.com/in/yvon-renotte-54a91a13](http://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 termes 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. À 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's 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" <sup>1</sup>.

### Abstract

#### Holography, Holograms, Electronic Avatars, What They Didn't Tell . . . <sup>2</sup>

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" <sup>1</sup>.

### Préambule

On m'a souvent demandé : **Qui a inventé la 3D ?**

La réponse est relativement simple : **La Nature !**

et elle a doté les êtres vivants (du moins le règne animal) de multiples moyens de la percevoir, dont la vision binoculaire mais nous verrons que ce n'est pas le seul.



1. Yvon Renotte, *Vous avez dit « Hologrammes » ? . . .*, Sciences et Culture, 477 (janvier – février 2019), 16 – 23 ; <http://hdl.handle.net/2268/258667> ; Et les « vrais hologrammes », *c'est quoi au juste ?*, Sciences et Culture, 477 (janvier – février 2019), 24 – 31 ; <http://hdl.handle.net/2268/258668> ; Non, les hologrammes ne se produisent pas sur scène, *Dailyscience.be*, 13 janvier 2020, interview ; <http://hdl.handle.net/2268/258699>
2. Yvon Renotte, *Holographie, Hologrammes, Avatars électroniques, ce que l'on ne vous a pas dit . . .* (2023), <https://hdl.handle.net/2268/300493>

Nous n'avons, si l'on peut dire, tenté que de l'imiter en développant des techniques de plus en plus sophistiquées pour *reproduire nos sensations visuelles*, . . .

- dessin, peinture, bas-reliefs, sculpture, perspective, trompe l'œil, *Pepper's Ghost*,
- photographie, stéréoscopie, cinématographie, télévision,
- holographie, *Performance Capture 3D*, réalité augmentée, imprimantes 3D . . . et la liste ne cesse de s'allonger,

. . . réelles . . . ou non. Les procédés récents de *réalité augmentée* ne réussissent-ils pas à nous faire « évoluer dans des mondes virtuels » ?

J'ai volontairement choisi de ne pas « écrire d'équations » afin de ne pas rebuter dès l'abord, la(e) lectrice(teur) peu aguerri(e). J'ai préféré décrire les processus et les documenter en proposant des références qui permettront aux intéressé(e)s d'y trouver réponse à leurs éventuels questionnements. De même, je limiterai la présentation des applications à quelques champs « associés, de près ou de loin, au spatial ». Plusieurs sujets sont développés dans des notes séparées dont je joins une liste et les liens en annexe.

## **Prolégomène : les Bases**

### **Introduction**

**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 *les deux sont à la fois une technique, un art et une science* !

### **Quelques rappels**

**La photographie**<sup>3</sup> est née au tout début du 19<sup>e</sup> siècle<sup>4</sup>. 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. 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 argentine 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 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

---

3. Yvon Renotte, *Holographie, Hologrammes, Avatars électroniques – 2<sup>e</sup> partie* ; <https://hdl.handle.net/2268/301852> (2023), 3-5

4. 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

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 née <sup>5</sup>. 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. Les innovations, le plus souvent intuitives, vont s'enchaîner : fixation des images par un bain d'hyposulfite de soude, utilisation du bromure d'argent plus sensible qui permet des poses de quelques secondes, premières photographies en couleurs, la gélatine remplace le collodion comme substrat et abaisse la durée d'exposition sous la seconde. Les sociétés, *Kodak*, *Agfa-Gevaert*, *Ilford*, . . . apparaissent, se multiplient et grossissent jusqu'à devoir muter vers le numérique au début du 21<sup>e</sup> siècle <sup>6</sup>.

Figure 1 – Ils ont inventé la photographie argentique



Figure 2 – Les pionniers de la photographie



5. 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

6. Yvon Renotte, *Holographie, Hologrammes, Avatars électroniques – 2<sup>e</sup> partie* ; <https://hdl.handle.net/2268/301852> (2023), 5-6

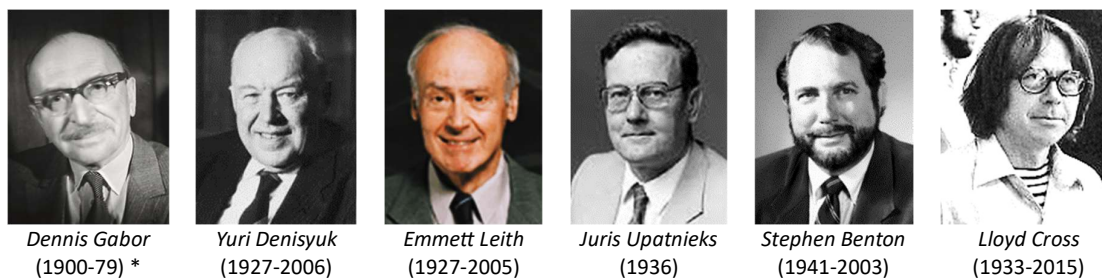
7. Nathaniel Herzberg, *Les premières photographies couleur révèlent leurs secrets*, Le Monde Actualité – Science & Médecine, N° 22270 (28-03-2018), 2

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).

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.

**L'holographie**<sup>8</sup>, 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 Denisyuk*, 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*<sup>9</sup>. . . et les sources lumineuses disponibles à l'époque sont insuffisamment cohérentes. Il faudra attendre l'invention du LASER 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



\*) 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 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<sup>10</sup>.

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*<sup>1,11</sup>.

**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

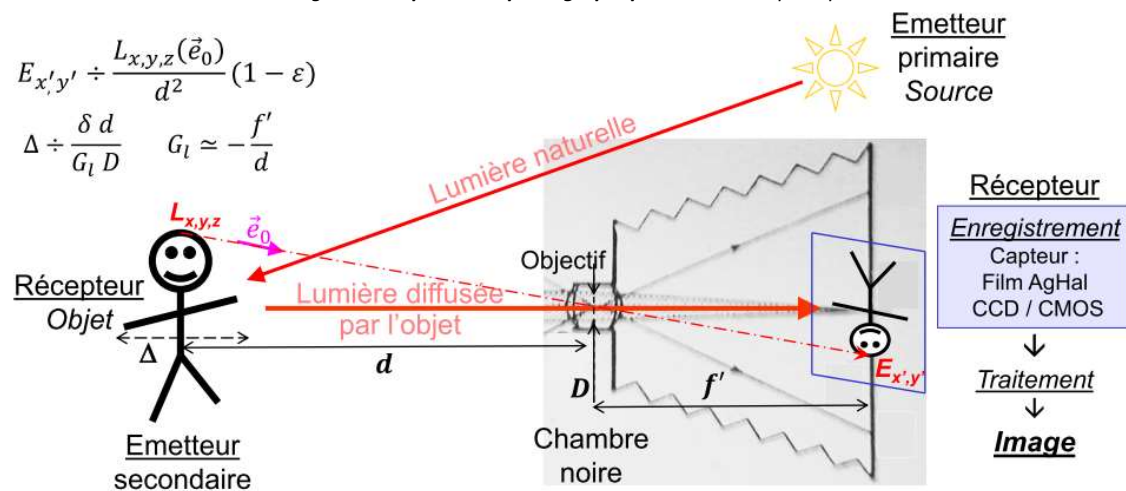
8. Yvon Renotte, *Holographie, Hologrammes, Avatars électroniques – 2<sup>e</sup> partie* ; <https://hdl.handle.net/2268/301852> (2023), 6-7  
 9. Pierre Léna et Alain Blanchard, *Lumières, une introduction aux phénomènes optiques*, InterEditions (1990), 197-236  
 10. Yvon Renotte, *Holographie, Hologrammes, Avatars électroniques, ce que l'on ne vous a pas dit . . .*, <https://hdl.handle.net/2268/300493> (2023), 10-13 et 29-38  
 11. Philippe Gentet and Seung-Hyun Lee, *True holographic ghost illusion*, *Optic Express*, 30 (15), (2022), #465247, 8 pages

réussi à produire des images holographiques animées grâce à un nouveau matériau réinscriptible. Et les résultats ont été améliorés tout récemment <sup>12</sup>. *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 processus photographique et holographique

**Le processus photographique** [Figure 4] <sup>13</sup> 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'éclairements  $E(x',y')$  correspondant à une distribution 3D de *luminances*  $L(x,y,z)$ , improprement appelées « intensités lumineuses » <sup>14</sup>, 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-éclairage (développement et/ou blanchiment), le processus photographique fonctionne en « un temps » : l'image de la scène photographiée apparaît directement sur le capteur.

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 ;  $\epsilon$ ,  $G_l$ ,  $D$  et  $f'$  : facteur de déperdition, grandissement linéaire, diamètre du diaphragme et longueur focale de l'objectif ;  $\delta$  : taille d'un pixel du capteur photosensible ;  $\Delta$  : profondeur de champ - en première approximation, elle est proportionnelle à la distance frontale de la scène  $d$ , à la taille des pixels  $\delta$ , et inversement proportionnelle au grandissement linéaire de l'objectif  $G_l$  et au diamètre de l'obturateur  $D$ . *Les photographes savent d'expérience que  $\Delta$  est d'autant plus grande que la scène est éloignée et que l'instrument est diaphragmé.*

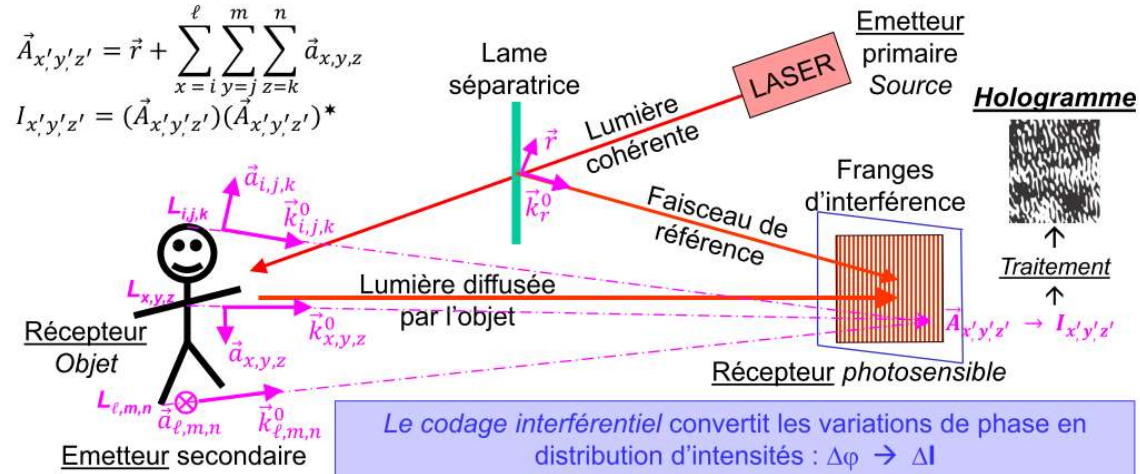
#### En éclairage incohérent, on somme les intensités : la photographie « manipule » des rayons lumineux

! 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 !

12. 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
13. Yvon Renotte, *Holographie, Hologrammes, Avatars électroniques – 2<sup>e</sup> partie* ; <https://hdl.handle.net/2268/301852> (2023), 7-8
14. L'**éclairage 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 m<sup>2</sup>* (photométrie). Habituellement la photographie utilise le système photométrique, l'holographie le système radiométrique.

Le processus holographique [Figures 5] <sup>15</sup> établit également une relation biunivoque entre la distribution 3D des luminances  $L(x,y,z)$  des points d'une scène 3D et les éclairiments  $E(x',y',z')$  des points correspondants d'une image 3D (virtuelle ou réelle selon les cas) mais en *deux temps*.

Figure 5.a - **Le processus holographique – 1<sup>re</sup> étape : Codage**  
Enregistrement - schéma de principe

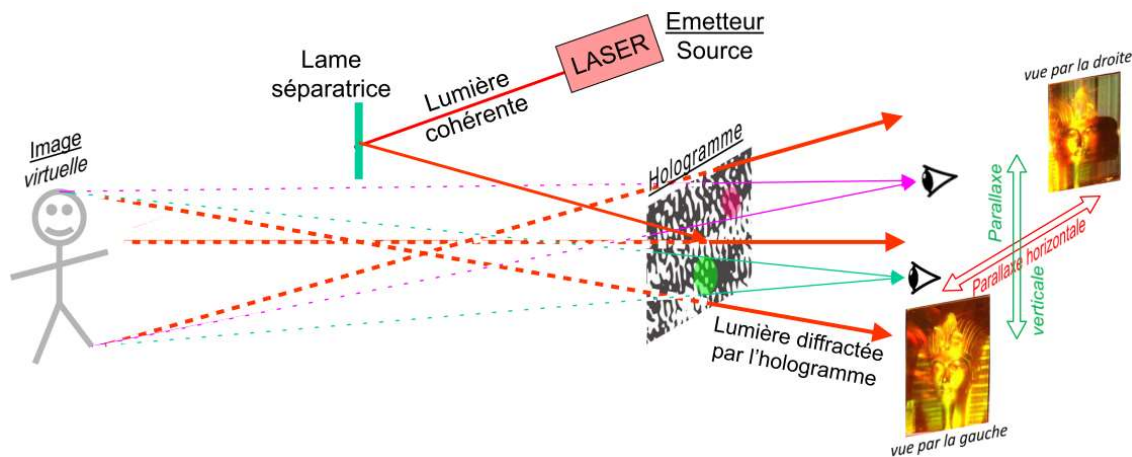


$\vec{A}_{x',y',z'}$  : l'amplitude (complexe) résultante au point  $(x',y',z')$  est la somme des amplitudes (complexes)  $\vec{a}_{x,y,z}$  provenant de tous les points de la scène-objet ; *chacun des pixels* du capteur photosensible reçoit les informations provenant de *tous les points* de la scène-objet 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 5.b - **Le processus holographique - 2<sup>e</sup> 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)

15. Yvon Renotte, *Holographie, Hologrammes, Avatars électroniques – 2<sup>e</sup> partie* ; <https://hdl.handle.net/2268/301852> (2023), 8-10

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) !

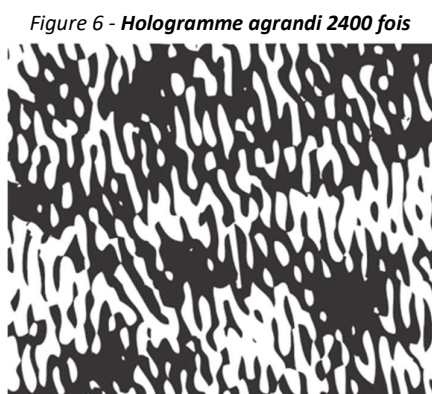
Le point commun avec la photographie se limite quasiment à l'utilisation d'un même matériau d'enregistrement dans les premiers temps de l'holographie, des émulsions argentiques AgHal (aux halogénures d'argent)<sup>16</sup>. On notera toutefois que les émulsions utilisées en photographie ont des caractéristiques 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  $\mu\text{m}$ ) avec un pouvoir couvrant élevé. Elles ne peuvent pas être utilisées en holographie. Cette technique requiert l'usage d'émulsions spécifiques, à *grains ultra-fins* ( $\varnothing = 35$  à  $90\text{ nm}$ ) uniformément distribués dans le volume du substrat gélatine.

$1\ \mu\text{m} = 10^{-6}\ \text{m} = 1$  millionième de mètre ;  $1\ \text{nm} = 10^{-9}\ \text{m} = 1$  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 Anglais<sup>17</sup>. 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.

### Les différents types d'hologrammes<sup>18</sup>

**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'autre. La qualité des hologrammes sera appréciée par le **rendement diffractif** de l'hologramme  $\eta$  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 (dans tous les ordres) au flux incident. En pratique, il est donc utile / nécessaire de préciser la signification exacte de la grandeur effectivement considérée dans le cas traité.



Hologramme d'amplitude par transmission

© Alain Debay, Club Athena - asbl ICARE, Charleroi

En l'absence de décodage, les *hologrammes sont illisibles* [Figure 6]. 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.

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* à condition qu'elle ne soit pas « noyée » dans l'ordre zéro.

16. Pierre Glafkides, *Chimie et physique photographiques*, éd. Paul Montel, 4<sup>e</sup> 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

17. 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

18. Yvon Renotte, *Holographie, Hologrammes, Avatars électroniques – 2<sup>e</sup> partie* ; <https://hdl.handle.net/2268/301852> (2023), 13-15

La géométrie

Figure 7.a – Hologrammes par transmission : enregistrement

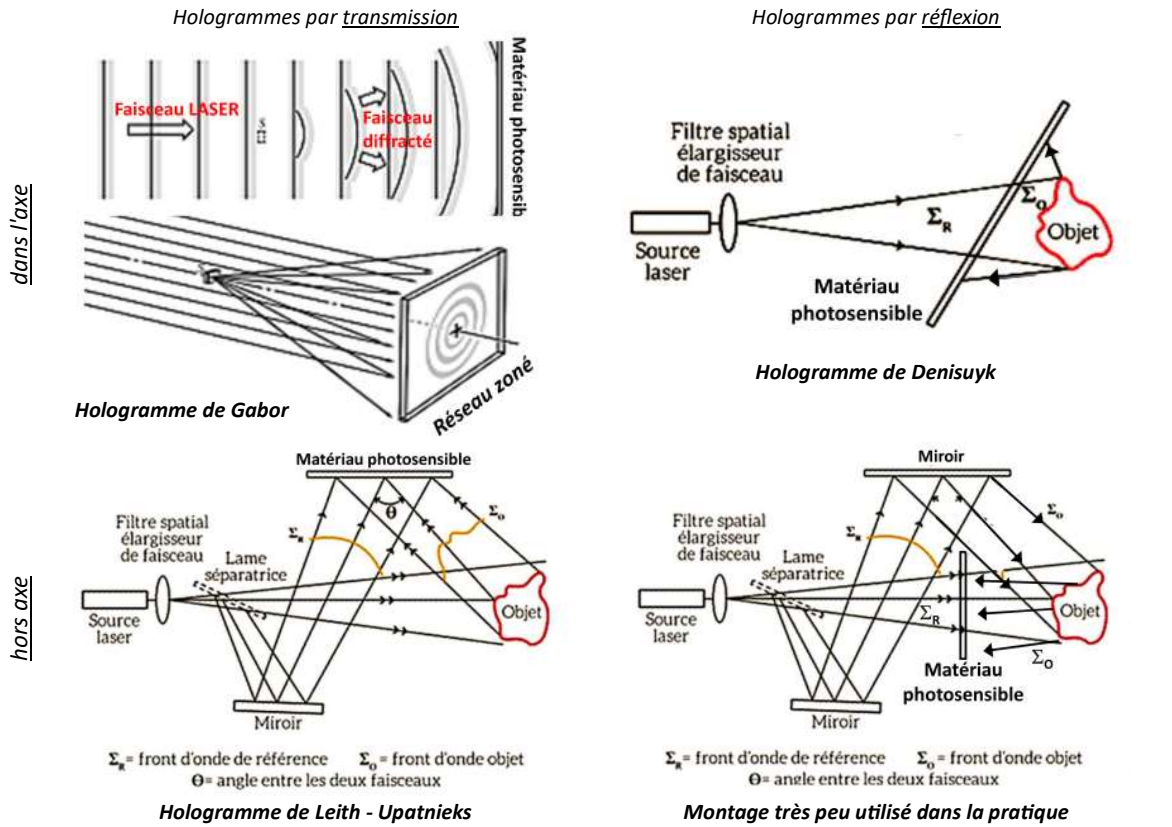
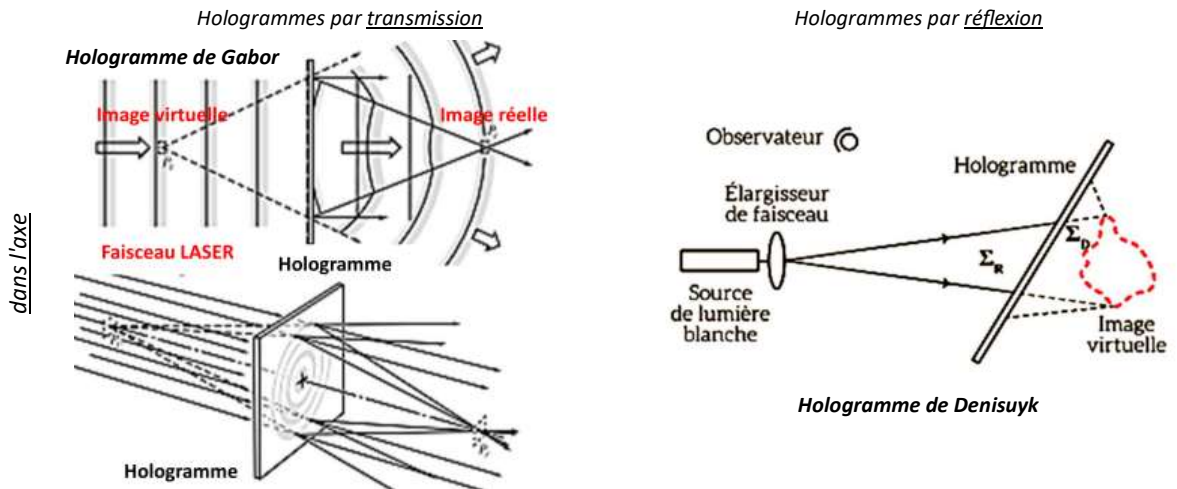


Figure 7.b – Hologrammes par transmission : reconstruction





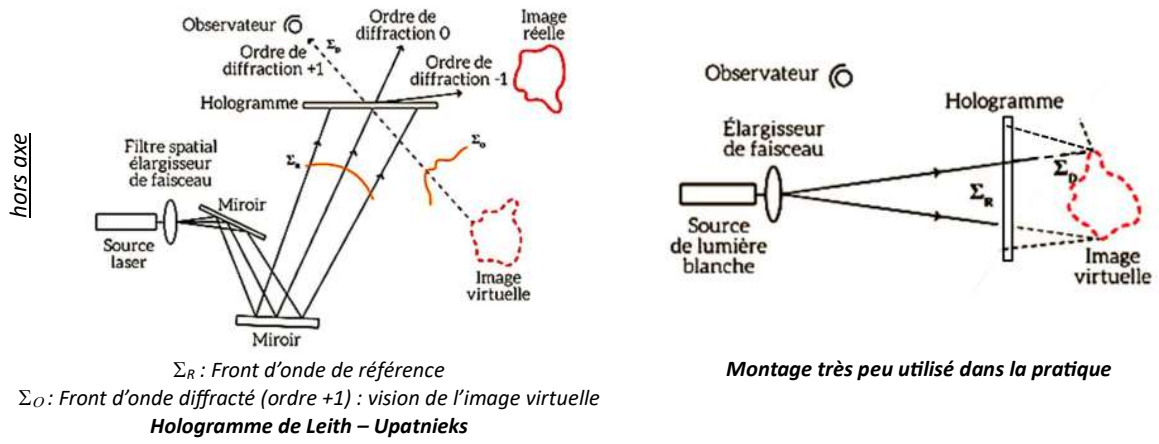


Figure 7.c – Hologrammes par transmission : Images virtuelle et réelle

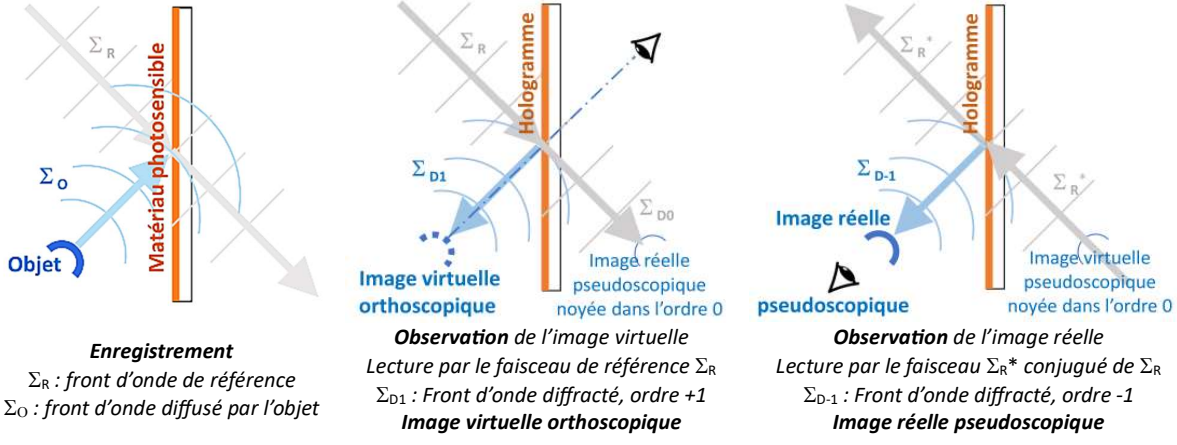
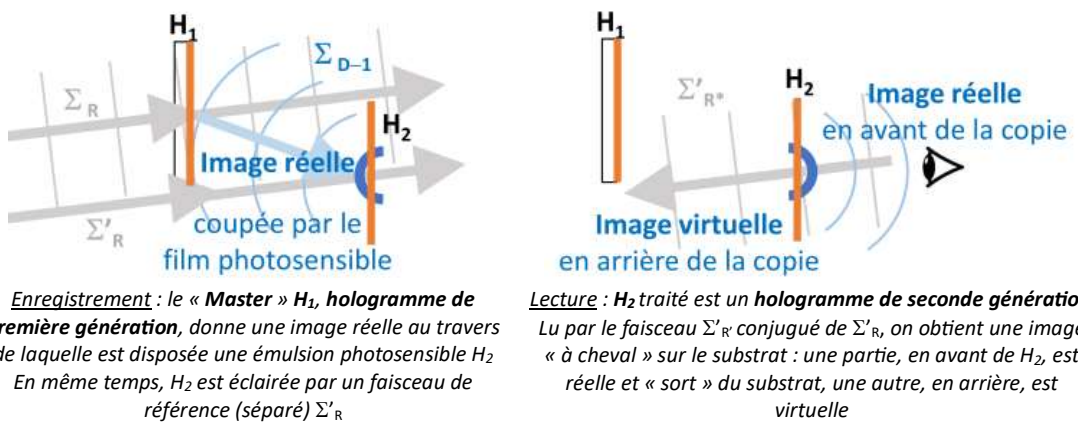


Figure 8 – Hologrammes de seconde génération<sup>19</sup>



Le matériau d'enregistrement<sup>20</sup>

Le matériau d'enregistrement et son traitement post-exposition éventuel détermine(nt) comment l'hologramme « module » le faisceau de lecture  $\Sigma_R$  : celui-ci étant cohérent, agit soit sur la transmission et module l'amplitude, soit est totalement transparent dans le visible et agit sur la phase via des micro-

19. Yvon Renotte, *Holographie, Hologrammes, Avatars électroniques – 2<sup>e</sup> partie* ; <https://hdl.handle.net/2268/301852> (2023), 16  
 20. Yvon Renotte, *Holographie, Hologrammes, Avatars électroniques – 2<sup>e</sup> partie* ; <https://hdl.handle.net/2268/301852> (2023), 16-18

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 <sup>21</sup>.

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* <sup>21</sup>.

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 <sup>22</sup>. On les classe en deux familles en fonction du rapport entre l'épaisseur  $d$  du matériau photosensible et l'interfrange moyen (période spatiale)  $\Lambda$  du réseau y inscrit. Il est dit « **en volume** » (ou *épais*) lorsque  $d$  est nettement supérieur à  $\Lambda$  et « **mince** » dans la situation opposée. Dans le premier cas, le régime de diffraction est celui de Bragg : les hologrammes sont très sélectifs spectralement et angulairement. 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 », 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. Elle repose sur le paramètre  $Q = 2\pi\lambda_0 d/n_0\Lambda^2$ , si  $Q < 1$  : l'hologramme est en surface, si  $Q > 1$  : il est en volume ;  $n_0$  est la valeur de l'indice hors modulation et  $\lambda_0$  la longueur d'onde d'enregistrement [Tableau 1]. 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.

**La pixellisation** (taille des microcristaux des émulsions argentiques, 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  $\Lambda = \lambda_0/2 n_0 \sin(\theta/2)$ ,  $\lambda_0$  étant la longueur d'onde d'enregistrement,  $n_0$  l'indice de réfraction « hors modulation » du matériau et  $\theta$  l'angle entre les faisceaux de référence et objet « moyens ». Il en résulte une contrainte sur la valeur de cet angle <sup>22,23</sup>.

**N.B. La stéréoscopie** <sup>24</sup> est la technique d'imagerie 3D la plus « proche » de la photographie, elle exploite la vision binoculaire, un des moyens dont la Nature a doté le règne animal, pour percevoir le relief.

Contrairement à l'holographie, la stéréoscopie produit un « relief figé », sans possibilité de modifier la parallaxe (horizontale et verticale) fixée par la géométrie de l'ensemble « scène – dispositif d'enregistrement », lors de cette opération. **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 !

---

21. 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

22. Yvon Renotte, *Holographie, Hologrammes, Avatars électroniques – 2<sup>e</sup> partie* ; <https://hdl.handle.net/2268/301852> (2023), 17-20

23. 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

24. Yvon Renotte, *Holographie, Hologrammes, Avatars électroniques – 2<sup>e</sup> partie* ; <https://hdl.handle.net/2268/301852> (2023), 10-13

**Résumé : Tableau 1 – Les divers types d’hologrammes**

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

<b>- Matériaux photosensibles utilisés pour l’enregistrement et traitements</b>		
- 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	

<b>- Caractéristiques</b>		
- 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	transmission « mince »		transmission « en volume »		réflexion « en volume »	
	amplitude	phase	amplitude	phase	amplitude	phase
$\eta$ (théorique) <sup>25</sup>	10%	40%	5%	100%	15%	100%

**Annexe : Table des matières sommaire :** in « Yvon Renotte, ; *Holographie, Hologrammes, Avatars électroniques, ce que l’on ne vous a pas dit . . .* » ; <https://hdl.handle.net/2268/300493> (2023)

- *Holographie : Matériaux pour l’enregistrement holographique – Multimédia – Pseudo-couleurs – Double et multi-exposition - Vidéo-holographie – Estampes – Stéréogrammes - Multiplex holographiques* p.8
- *Interférométrie holographique - Vidéo-holographie* p.13
- *Hologrammes de deuxième génération – Pseudo-couleurs* pp.15 et 17
- *Télévision et cinéma holographiques* p.18
- *Stéréoscopie – Anaglyphes – Speckle* p.21
- *Avenir de l’holographie ?* pp.29 et 34
- *Images holographiques à 360°* p.38
- *Et la vraie couleur ?* p.40
- *L’interférométrie accidentelle – le moiré optique* p.49
- *Les hologrammes calculés / synthétiques – Les DOEs, HOEs et coHOEs* p.54
- *Vivons-nous dans un hologramme ?* p.63

Merci à Yves Gentet, ing. The Ultimate Holography®, qui m’a communiqué les travaux les plus récents de son frère, Philippe, à propos des Pepper’s ghost.

25. 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