

Holographie, . . .

Hologrammes, . . .

Avatars électroniques . . .

ce que l'on ne vous a pas dit . . .

L'éternel retour des « pseudo-hologrammes »

(45 années de pratique en holographie !)

[version provisoire et incomplète – mars 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 -
www.hololab.ulg.ac.be

Trois parties

- **Holographie et Hologrammes** : *Candide et le physicien* : Jeu de questions – réponses
- **Holographie et Hologrammes** : *Aspects physique, analytique et quelques applications*
- **Hologrammes vs Avatars électroniques**

Table des matières

- [Avant-propos](#) p.2
- 1^{re} partie : **Holographie et Hologrammes** : *Candide et le physicien* : Jeu de questions – réponses
 - [Introduction](#) p.4
 - [Holographie](#) : ce que vous avez toujours voulu savoir . . . p.6
 - 1^{re} question : Quelques notions préliminaires – types d'hologrammes p.6
 - [Matériaux](#) pour l'enregistrement holographique – Multimédia – [Pseudo-couleurs](#) p.8
 - [Double et multi-exposition](#) - [Vidéo-holographie](#) – [Estampes](#) – [Stéréogrammes](#)
[Multiplex holographiques](#)
 - [Interférométrie holographique](#) : Vidéo-holographie – Estampes – Stéréogrammes p.13
 - [Hologrammes deuxième génération](#) p.15
 - 2^e question : Pseudo-couleurs p.17
 - 3^e question : [Télévision](#) et [cinéma holographiques](#) p.18
 - [Stéréoscopie](#) – [Anaglyphes](#) – Lunettes polarisantes et LC – Speckle p.21
 - [Conclusion](#) p.27
 - Des questions . . . que l'on n'a pas posées p.29
 - [Grandeur et décadence de l'holographie](#) : [L'holographie a-t-elle \(encore\) un avenir ?](#) p.29 p.34
 - [Images holographiques à 360°](#) - Hologrammes multi-images et multi-canaux p.38
 - [Et la vraie couleur ?](#) p.40
 - [L'interférométrie accidentelle](#) : le moiré « parasite » p.49
 - [Les hologrammes calculés / synthétiques](#) – Les DOEs, HOEs et coHOEs p.54
 - [Vivons-nous dans un hologramme ?](#) p.63
 - [Annexes](#) : Imageries 2 et 3D ; Des matériaux photosensibles ; École de photographie de Liège p.66

Avant-propos

- Mon but n'est pas de produire un cours d'holographie optique, il en existe d'excellents¹. Dans un premier temps, je souhaitais dénoncer les *habus de langage courants qui qualifient d'holographie et d'hologrammes des processus d'imagerie 3D, voire 2D, qui n'en sont pas*. Corollairement, il me paraît indispensable de rappeler ce qu'est réellement la « *res holographica* » sans nécessairement trop entrer dans des détails théoriques ni techniques. Selon son degré d'intérêt et son niveau de compétence préalable, le lecteur intéressé par ces aspects trouvera ce qu'il cherche dans les ouvrages référencés ou dans les notes explicatives annexées. Je me limiterai dans un premier temps à simplement fournir une introduction la plus accessible possible à un large public. J'ai néanmoins modifié mon approche et revu mes ambitions mon propos. J'ai choisi de simplement proposer une sorte de « *vade-mecum* » de ce qu'il serait utile que « *tout un chacun(e)* » intéressé(e) par le sujet connaisse à propos de l'holographie. Je n'ambitionne toutefois pas d'être exhaustif ce qui serait présomptueux, simplement d'*ouvrir une porte à celles et ceux qui souhaiteraient aller plus loin*.

- Le lecteur attentif sera peut-être étonné de constater que beaucoup de références sont relativement anciennes, certaines ont plus de cinquante ans. Cette situation est simplement liée au fait que mon propos est plus de tenter d'expliquer à tout-un-chacun ce qu'est réellement l'holographie, que de détailler les applications les plus récentes de la technique.

Le principe de l'holographie a été énoncé en 1948 par le physicien Anglo-Hongrois *Dennis Gabor* (1900-78) mais n'a pu être exploité qu'après l'invention du LASER en 1960. Les premiers hologrammes de transmission et de réflexion ont été présentés entre 1962 et 64 aux Etats-Unis [*Juris Upatnieks* (1936) et *Emmett Leith* (1927-2005)] et en Union-Soviétique [*Yuri Denisjuk* (1927-2006)]. Dès cette période l'imagerie holographique a connu un engouement extraordinaire auprès du grand public et les

1. - quelques ouvrages en Anglais :

- John B. DeVelis and George O. Reynolds, *Theory and Applications of Holography*, Addison-Wesley Educational Publishers Inc., 1st ed. (1967)
- Howard M. Smith, *Principles of Holography*, Wiley-Interscience (1969)
- George W. Stroke, *An introduction to Coherent Optics and Holography*, Academic Press Inc., 2nd ed. (1969)
- Henry John Caulfield and Sun Lu, *The applications of Holography*, Wiley Series in Pure and Applied Optics, Wiley Interscience (1970)
- Robert Jacob Collier, Christoph B. Burckhardt, Lawrence H. Lin, *Optical Holography*, Academic Press Inc. (1971)
- Parameswaran Hariharan, *Optical Holography – Principles, Techniques and Applications*, Cambridge Studies in Modern Optics n°2 (1983) ; *Basics of Holography*, Cambridge University Press (2002)
- quelques ouvrages en Français :
- Maurice Françon, *Holographie*, Masson & Cie, Maîtrise de Physique et Ecoles d'Ingénieurs – Recherche appliquée (1969)
- Jean-Charles Viénot, Paul Smigielski et Henri Royer, *Holographie optique – Développements, Applications*, Dunod – Paris (1971)
- Paul Smigielski, *Holographie industrielle*, Teknea s.a. Toulouse (1994) ; *Holographie et Applications*, CNRS - Atelier de Mécanique, Saint-Etienne (6-12/07/2004) [PDF]
- quelques chapitres d'ouvrages d'Optique
- Eugene Hecht, *Optics*, Chap. 14.3 - *Holography*, Addison-Wesley Publishing Co., 2^d ed. (1987), 593-610
- Max Born and Emil Wolf, *Principles of Optics : Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, Chap. 8.10 – *Gabor's Method of Imaging by Reconstructed Wave Fronts (Holography)*, Pergamon Press, 6th (corrected) ed. (1989), 453-458
- José-Philippe Pérez, *Optique géométrique et ondulatoire*, Chap. 29.V – *Holographie*, Masson éd., 4^e éd. (1994) 330-333

principaux types d'hologrammes ont tous été « inventés » en une dizaine d'années. Malheureusement, les limitations de ce type d'imagerie se sont révélées (notamment l'absence de mouvement et la difficulté à reproduire les couleurs) en même temps et ont entraîné un désintérêt progressif vu les difficultés rencontrées pour les surmonter. A partir des années '90, l'holographie a peu-à-peu déserté le domaine de l'imagerie pour trouver des champs d'applications non moins importants mais plus discrets dans l'industrie, les techniques de métrologie et le contrôle non destructif, le monde médical, la publicité, la lutte anti-contrefaçon, le patrimonial et la conservation des œuvres, le stockage d'informations, les micro-composants optiques très précieux pour le « *spatial* » où « *chaque gramme coûte cher* » (**H**olographic **O**ptical **E**léments et **C**omputer generated **H**OEs),

Cette évolution explique au moins partiellement, la distribution chronologique des références.

- **L'holographie**, comme la plupart des systèmes imageants, utilise **la lumière** pour véhiculer l'information. Il est donc utile de savoir de quoi il s'agit ! Un débat a longtemps « secoué » le monde scientifique à propos de la nature de la lumière : **onde ou corpuscule ?** Ou les deux : **onde et particule ?** Vu le rôle essentiel de la lumière dans le processus holographique, permettez-moi de conseiller quelques ouvrages (de niveaux de difficulté divers) qui permettront d'éclairer la question (*sans jeu de mot !*).

- « tout public »

Pierre Léna et Alain Blanchard, *Lumières – Une introduction aux phénomènes optiques*, InterEditions (1990)

Émile Biémont, *La Lumière*, Presses Universitaires de France – collection Que sais-je ? (1996)

- « tout public / public plutôt averti »

Richard Feynman (prix Nobel de Physique 1965), *Lumière et matière : une étrange histoire*, InterEdition, Points – Sciences (1987) et *La nature des lois physiques*, Marabout Université (1970)

- « public averti / spécialisé »

Thomas Durt, *Expérience à choix retardé de Wheeler et Complémentarité onde – particule*, Photoniques, 115 (2022), 23-27 ; <https://www.photoniques.com/articles/photon/abs/2022/04/contents/contents.html>
[Expérience à choix retardé de wheeler et complémentarité onde-particule | Photoniques](#)

Première partie : Holographie et Hologrammes

Candide et le physicien : Jeu de questions – réponses

Introduction

J'avais initialement envisagé d'intituler le sujet² abordé ici « *Hologrammes vs Ectoplasmes* »³ mais ai changé d'avis. Bien que le terme « *Ectoplasme* » fasse partie de la panoplie des jurons pittoresques extraits du vocabulaire « coloré » du célèbre Capitaine Haddock, je l'ai estimé inopportun après réflexion. Il me paraît en effet avoir une connotation « péjorative » inappropriée et certainement imméritée puisqu'il concerne une méthode d'imagerie tout-à-fait « honorable », largement utilisée dans les médias et qui plus est, fort appréciée par le grand public.

J'ai utilisé la qualification pendant un certain temps : c'était une erreur d'appréciation commise jusqu'à ce que je me rende compte que l'on ne lutte pas contre l'avis, le verdict populaire (en la matière). J'ai donc choisi d'utiliser une terminologie mieux appropriée décrivant le processus technique qui intervient effectivement : *la capture optique de mouvement en 3D*.

Très spectaculaire, le procédé a gagné « ses lettres de noblesse », à juste titre.

Enfin, mon but étant plus de familiariser le lecteur intéressé à la réalité du processus holographique que d'en stigmatiser les dérives éventuelles, *il m'a paru plus réaliste de s'accommoder de la situation en rappelant aussi souvent que nécessaire qu'il ne s'agit pas d'holographie mais d'un avatar électronique.*

Cela étant précisé, revenons à l'holographie proprement dite.

J'aurais pu intituler cet ouvrage « *L'holographie, mais c'est (très) simple !* » ou « *L'holographie pour les (presque) Nuls* ». Outre le fait d'introduire un a priori plutôt péjoratif à l'égard du lecteur, ce que je ne veux pas, le « *hic* » est que le processus et la technique holographiques ne sont ni (très) simples, ni (très) aisés à expliquer, . . . et encore moins à mettre en œuvre. Ils requièrent un « certain niveau » de connaissances en physique et en chimie, le matériel et le savoir-faire adéquats.

Les appellations « *Holographie et Hologrammes* » étant de plus en plus souvent utilisées, à tort, pour désigner des techniques d'imagerie 3D en tous genres, qui n'ont le plus souvent « rien à voir avec l'holographie », j'ai donc choisi de tenter de sensibiliser le grand public à ces abus de langage.

Au risque de décourager les lecteurs néophytes d'entrée de jeu et de perdre beaucoup d'entre eux, notamment ceux potentiellement intéressés qui ont entrepris la lecture de l'ouvrage, il m'a paru

2. Yvon Renotte, *Vous avez dit « Hologrammes » ? . . .*, Sciences et Culture, 477 (janvier – février 2019), 16 – 23 ; <http://hdl.handle.net/2268/258667>

Yvon Renotte, *Et les « vrais hologrammes », c'est quoi au juste ?*, Sciences et Culture, 477 (janvier – février 2019), 24 – 31 ; <http://hdl.handle.net/2268/258668>

Yvon Renotte, *Non, les hologrammes ne se produisent pas sur scène*, Dailyscience.be, 13 janvier 2020, interview ; <http://hdl.handle.net/2268/258699>

Yvon Renotte, « *En solo mais pas seul* » ... *il chante avec son « double holographique »*, Contact (Bulletin de l'université du 3^e âge de Liège), 2020/2 (mars – avril 2020), 28 – 29 ; <http://hdl.handle.net/2268/258847>

3. Yvon Renotte, *Hologrammes vs Ectoplasmes*, Contact (Bulletin de l'université du 3^e âge de Liège), 2021/5 (novembre – décembre 2021), 21 – 23 ; <http://hdl.handle.net/2268/264862>

Yvon Renotte, *ABBA propose un nouvel album et un spectacle « holographique »*, Science et Culture, 487 (avril 2022), 28 – 29 ; <https://hdl.handle.net/2268/289846>

nécessaire d'aborder le sujet par une voie susceptible de les « apprivoiser », si vous me permettez l'expression. Il fallait trouver, utiliser, une approche aussi peu analytique que possible, qui soit principalement descriptive, pourquoi pas « ludique » puisque j'ai « ce qu'il faut » sous la main : **un jeu de « questions – réponses »**.

J'ai choisi d'approcher le sujet par ce biais. La méthode peut surprendre mais elle correspond à une situation vécue il y a une vingtaine d'années lorsque le Dr Moreau, directeur de la Maison de la Science de Liège à l'époque, m'a soumis un ensemble de questions relatives à l'holographie et aux hologrammes, qui lui avaient été posées lors d'un Forum des Sciences qu'il patronnait.

Il s'agissait en fait de trois jeux de questions auxquelles j'avais choisi de répondre oralement, via un enregistrement audio, parce que la méthode me paraissait plus rapide et surtout plus aisée à mettre en œuvre avec les moyens de l'époque.

Je vais donc essayer de transcrire aussi correctement que possible les questions posées, ainsi que les réponses parce qu'elles me paraissent illustrer la perception du processus holographique par le grand public, perception qui s'avère souvent très différente de la réalité. J'ai évidemment reformaté le texte pour éviter les redites, bégaiements et imprécisions inévitables inhérentes au langage parlé.

J'ai emprunté la forme de la causerie à deux auteurs fort différents, E. Aisberg⁴ et B. d'Espagnat⁵ qui recourent chacun à leur manière à un « profane » interrogeant un « expert ». Le premier les appelle « *Ignotus* » et « *Curiosus* », le second se référant au Grand Voltaire, « *Candide* » et « *Le physicien* ». La méthode m'a paru bien adaptée à la présentation d'un échange de questions – réponses à la fois pour ne pas alourdir le texte mais aussi familiariser le lecteur de manière ludique avec le processus et la technique holographiques, matières qui pourraient s'avérer « rebutantes » si présentées sur un mode (trop) académique.

Les bases scientifiques et développements techniques de l'holographie seront abordés ultérieurement selon une gradation permettant aux lecteurs « d'entrer » plus ou moins profondément dans leur analyse en fonction des connaissances et acquis préalables de chacun.

Permettez-moi de terminer cette introduction en citant à nouveau E. Aisberg : « *Pour vulgariser, point n'est besoin d'être vulgaire. Pour être simple, nul besoin d'explications simplistes. Et pour être sérieux, il n'est pas nécessaire d'être ennuyeux.* »⁴. Je vais tenter de suivre ces quelques réflexions, recommandations pleines de bon sens en espérant entraîner le plus loin possible un maximum de lecteurs, même parmi les moins aguerris à la « *res scientifica* ».

4. Eugène Aisberg, *La radio ? . . . Mais c'est très simple !*, Editions techniques et scientifiques françaises – Dunod (1998)

5. Bernard d'Espagnat et Claude Saliceti, *Candide et le physicien*, Fayard – Le temps des sciences (2008)

Holographie : ce que vous avez toujours voulu savoir . . .

[1] *Candide* - « Suivant les conseils des organisateurs du Forum des Sciences, je me permets de m'adresser à vous à propos de la technique des Hologrammes. Pouvez-vous m'aider à répondre à plusieurs questions ? » (*)

« Peut-on, pour vulgariser, classer les hologrammes de la façon suivante ? D'un côté, les hologrammes de réflexion, de l'autre côté, les hologrammes de transmission ?

Dérivant des hologrammes de réflexion : gélatine dichromatée, multimédia, pseudo-couleurs, double exposition, multi-exposition, et dérivant des hologrammes de transmission : stéréogrammes, vidéo-hologrammes et estampes ? »

*) J'ai choisi de conserver les questions dans leur forme initiale à la fois par honnêteté intellectuelle et pour ne pas altérer l'expression de celles et ceux qui les ont posées. Leurs maladresses et confusions ainsi que les nombreuses répétitions attestent de manière évidente la « grande méconnaissance » du processus holographique, de la technique et de ses applications.

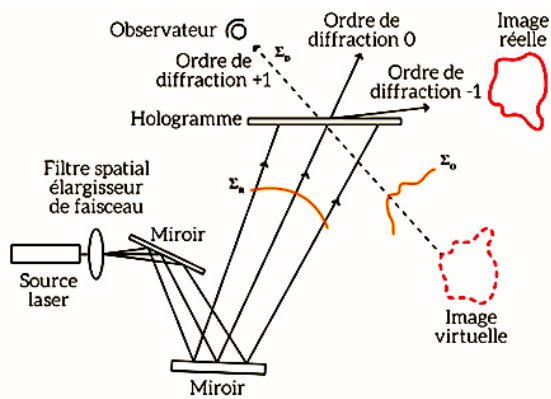
Le physicien - Permettez-moi de débiter par une « légère entorse » à la structure « questions – réponses » annoncée : je voudrais préalablement rappeler *ce que sont l'holographie et un hologramme*² sans toutefois entrer dès maintenant dans des détails techniques. Il me paraît en effet indispensable de préciser d'entrée de jeu ce dont « on va parler ».

L'holographie est une technique d'imagerie 3D qui permet de reproduire le *relief complet* d'une scène, c'est-à-dire les dispositions relatives des objets imagés dans l'espace, y compris leurs perspectives. Un *hologramme* est le substrat physique dans lequel l'image 3D est enregistrée par un procédé complexe d'interférométrie qui nécessite l'utilisation d'une source de lumière cohérente (un LASER). Par extension, la terminologie « hologramme » désigne également l'image holographique obtenue par le processus holographique. Notons encore que *le processus holographique comporte deux étapes : l'enregistrement et la lecture*.

Je vais maintenant essayer de détricoter l'embrouillamini de cette première question qui mélange plusieurs concepts. Je commencerai par rappeler, préciser la *classification des hologrammes en deux « grandes catégories » : les hologrammes en réflexion et en transmission*. Les premiers se comportent comme des « miroirs ». Plus précisément, on regarde les images holographiques comme des photographies ou des tableaux : la source lumineuse qui les éclaire à la lecture et l'observateur se trouvent du même côté de l'hologramme. Les seconds sont éclairés par l'arrière de l'hologramme. La source est donc située de l'autre côté de l'hologramme par rapport à l'observateur qui voit l'image holographique au travers du substrat. On notera que les hologrammes en réflexion peuvent être lus en lumière blanche alors que ceux en transmission seront lus en lumière cohérente (produite par un LASER), de préférence identique à (ou la plus proche possible de) celle utilisée lors de l'enregistrement. A ce stade, je n'irai pas plus loin dans la définition des paramètres et notions techniques évoquées ci-avant. Ils seront précisés ultérieurement dans un paragraphe spécifique.

Comme dit l'adage « *un petit dessin valant souvent mieux qu'une longue description* », je propose deux figures, *absentes des présentations*, pour illustrer les propos précédents. Afin de ne pas alourdir le texte, je me limiterai aux dispositifs de lecture des deux catégories d'hologrammes. Les schémas d'enregistrement seront présentés dans les paragraphes « techniques »⁶.

6. Christiane Carré (UMR Foton, CNRS / Université de Rennes, ENSSAT), Yvon Renotte (HOLOLAB de l'Université de Liège-Belgique), Paul Smigielski (président du club CMOI/SFO, Mulhouse), Xavier Allonas - Christian Ley (Laboratoire de Photochimie et d'Ingénierie Macromoléculaires (LPIM), Université de Haute Alsace, Mulhouse) et Safi Jradi (Laboratoire de Nanotechnologie et d'Instrumentation Optique, Université de Technologie de Troyes), *L'holographie, une reconstruction par la lumière grâce à un matériau photostructurable*, L'actualité chimique (France), 397-398 (juin-juillet 2015), 102-107 ; <http://hdl.handle.net/2268/259745>



Σ_r = front d'onde de référence
 Σ_o = front d'onde diffracté (ordre +1)
 permet la vision de l'image virtuelle

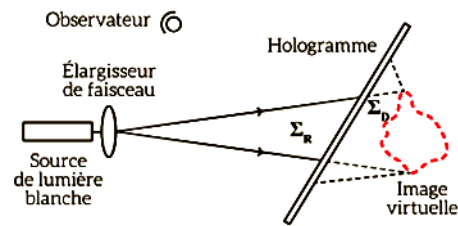


Figure 1 - Dispositifs de lecture
 - à gauche : des hologrammes de transmission
 - à droite : des hologrammes de réflexion



Hologramme de transmission - Yoann Atlas, ENSSAT – Lanion (F) : lu avec un LASER HeNe (632,8 nm) *
 plaque Ultimate Holography U0870 ⁵



Hologramme de réflexion exposé à la Maison de la Science de Liège (B) : lu en lumière blanche

Figure 2

*) Rappels : 1 μm (micromètre) = 1 millième de millimètre (10^{-3} mm) = 1 millionième de mètre (10^{-6} m)
 1 nm (nanomètre) = 1 millième de micromètre ($10^{-3} \mu\text{m}$) = 1 milliardième de mètre (10^{-9} m)

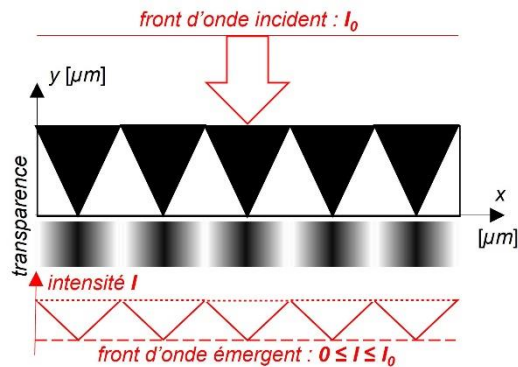
De ce qui précède nous retiendrons principalement que *la classification en hologrammes de réflexion et de transmission est tout-à-fait correcte*. La suite est plus hasardeuse parce que les différentes « spécifications » qui sont supposées caractéristiques des seuls hologrammes de réflexion désignent des « **types d'hologrammes** » ⁷ qui peuvent aussi bien être de réflexion que de transmission. Les conditions d'utilisation pratiques détermineront la catégorie la mieux appropriée à l'observation du « type d'hologramme » considéré.

Avant de poursuivre, je dois introduire une nouvelle classification des hologrammes en fonction de la manière dont ils modulent le faisceau lumineux qui les lit. **Les hologrammes d'amplitude modulent l'intensité du faisceau de lecture** par leur transparence, leur niveau de gris local, comme dans une image photographique. **Les hologrammes de phase**, tout-à-fait transparents dans le spectre visible, *modulent la phase du faisceau de lecture* via des micro-variations locales de l'indice de réfraction du matériau d'enregistrement ou d'un relief de surface. Les divers types de variation du paramètre « modulateur » sont produits dans le matériau photosensible lors de l'enregistrement et éventuellement fixés par un traitement physico-chimique postérieur. [voir § « Matériaux pour l'enregistrement holographique »]. Il s'agit en fait d'une « **sous-catégorie d'hologrammes** » parce que les hologrammes de transmission et de réflexion peuvent être d'amplitude ou de phase.

7. Yvon Renotte, *Holographie, Hologrammes et (quelques) Applications*, 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>

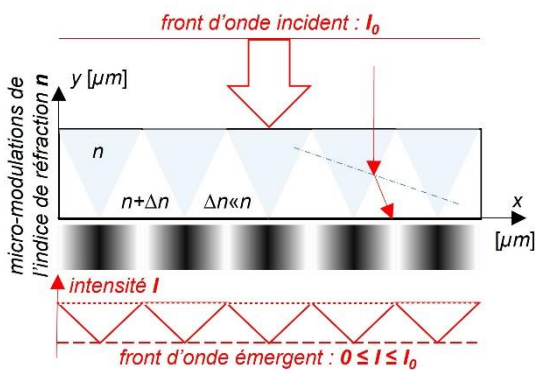
a. Hologrammes d'amplitude

Micro-distribution des zones de densités optiques différentes dans l'épaisseur du matériau



Hologrammes de phase

b. Micro-distribution des variations de la phase dans l'épaisseur du matériau



c. Micro-distribution des variations la phase sous forme de micro-reliefs à la surface du matériau

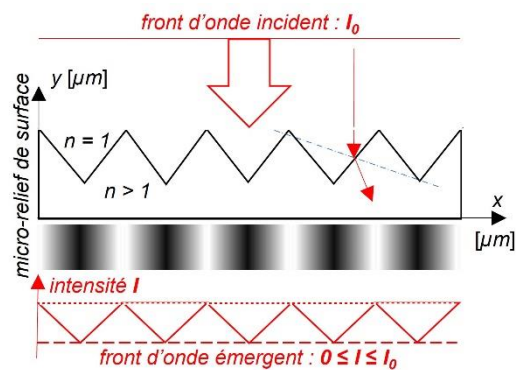


Figure 3

Les figures précédentes représentent schématiquement les différentes « sous-catégories d'hologrammes ». Elles montrent une « tranche » (x,y) , y étant l'épaisseur de la couche photosensible. On notera que, contrairement à la photographie qui est une distribution 2D des micro-variations de la transparence, en holographie ces micro-variations ainsi que celles de la phase sont aussi distribuées dans l'épaisseur du matériau d'enregistrement. L'enregistrement est donc volumique même si l'une des dimensions, y de l'ordre de quelques micromètres*, est nettement inférieure aux deux autres qui ont la taille surfacique du substrat et peuvent dépasser plusieurs dizaines de centimètres.

La *gélatine bichromatée* [DCG : *Dichromated Gelatin* en Anglais]⁸ est un matériau photosensible particulièrement bien adapté à l'enregistrement holographique en raison de propriétés physico-chimiques détaillées plus tard. Contrairement aux halogénures d'argent [AgHal]⁹, bases des matériaux argentiques photosensibles utilisés en « photographie classique » ainsi qu'en holographie, qui donne des hologrammes d'amplitude (en l'absence de traitements spéciaux), la DCG fournit directement des hologrammes de phase très lumineux.

Gélatine dichromatée est donc un anglicisme incorrect « mélangeant » les appellations française et anglaise du même matériau. Je continuerai toutefois à utiliser l'acronyme anglo-saxon DCG le plus courant dans la littérature spécialisée.

8. Dietrich Meyerhofer, *Dichromated Gelatin*, in « *Holographic Recording Materials*, Editor : Howard M. Smith », Topics in Applied Physics, Vol.20, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New-York (1977), 75-100

9. Hans I. Bjelkhagen, *Silver-Halide Recording Materials for Holography and their Processing*, Springer Series in Optical Sciences, Vol.66, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New-York (1993)

La DCG étant un matériau d'enregistrement holographique et non une catégorie d'hologrammes, elle peut aussi bien être utilisée pour enregistrer des hologrammes de transmission que des hologrammes de réflexion.

Les matériaux d'enregistrement jouent un rôle important dans la distribution des hologrammes entre les diverses « sous-catégories » en raison de leurs caractéristiques physico-chimiques. Les *émulsions argentiques* donnent des hologrammes d'amplitude alors que la *gélatine bichromatée* et les *photopolymères* donnent des hologrammes de phase. Un post-traitement, « *le blanchiment* » permet de transformer les hologrammes d'amplitude [AgHal] en hologrammes de phase. Une variante des hologrammes de phase est produite par un *microrelief de surface* : c'est le cas des *photorésines*. Les caractéristiques et propriétés des matériaux photosensibles évoqués seront détaillées dans le paragraphe « *Matériaux pour l'enregistrement holographique* ».

Il me paraissait nécessaire de préciser les points précédents avant de poursuivre. Cela étant, nous pouvons revenir au questionnaire.

- *Multimédia* : ne voyant pas le rapport que ce terme pourrait avoir avec la classification des hologrammes, j'ai consulté le dictionnaire pour en connaître la définition : « *Le multimédia est l'ensemble des techniques et des produits qui permettent l'utilisation simultanée et interactive de plusieurs modes de représentation de l'information (textes, sons, images fixes ou animées)* ». L'appellation ne me paraît donc pas uniquement applicable à l'holographie mais à un ensemble de systèmes, dispositifs et procédés d'enregistrement, reproduction et transmission de l'information. Je dirais que la radio, la télévision, la téléphonie, la photographie, . . . et bien d'autres sont des médias. Au titre de processus d'enregistrement et de reproduction d'images, l'holographie est un média, parmi d'autres, mais pas une catégorie ni un type d'hologramme.

- *Pseudo-couleurs* : le terme est on ne peut plus explicite : il « décrit » une image holographique « colorée » contrairement à la reproduction « classique » monochromatique, de la couleur du rayonnement LASER utilisé pour la lecture [par exemple rouge pour le LASER HeNe ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$), vert pour le LASER Ar⁺ ($\lambda = 514,5 \text{ nm}$), . . .] mais des couleurs observées ne sont pas les vraies couleurs de l'objet holographié. La plupart du temps, les couleurs résultent de la décomposition spectrale de la lumière blanche (ou d'un rayonnement polychromatique) qui éclaire l'hologramme. Ce sont donc de « *fausses couleurs* ». A priori, le processus peut aussi bien intervenir sur un hologramme de transmission que de réflexion même s'il est plus « évident » chez les hologrammes de transmission éclairés en lumière blanche. Il est utile de rappeler ici que les hologrammes sont des réseaux ce qui explique le phénomène d'irisation de la lumière blanche⁷. Nous analyserons plus tard le cas des hologrammes de réflexion qui peuvent être lus en lumière blanche et paraître quasiment monochromatiques . . . ou irisés.

Signalons encore qu'il existe des hologrammes de réflexion sur lesquels des artistes « peignent » des motifs colorés.



Hologrammes de transmission lus en lumière monochrome
a. HeNe – $\lambda = 632,8 \text{ nm}$



b. Ar⁺ - $\lambda = 514,5 \text{ nm}$
HOLOLAB - ULiege



Hologrammes de réflexion lus en lumière blanche
c. AgBr : quasi-monochrome
Henri Thiry - Yvon Renotte
HOLOLAB - ULiege



d. DCG : irisation

Figure 4

- *Double et multi-exposition* : je traiterai ces cas lorsque nous disposerons d'informations plus complètes relatives aux propriétés et caractéristiques des *interférogrammes* obtenus par des mécanismes plus « évolués » qui seront considérés séparément.

- *Vidéo-hologrammes* : Remarque préliminaire : comme signalé précédemment, les différentes « spécifications » qui sont attribuées cette fois aux seuls hologrammes de transmission désignent des « **types d'hologrammes** »⁷ qui peuvent aussi bien être de réflexion que de transmission. Ce sont également les conditions d'utilisation pratiques qui détermineront la catégorie la mieux appropriée à l'observation du « type d'hologramme » considéré.

Les *vidéo-hologrammes* : bien qu'il ne s'agisse pas d'une appellation « officielle », je suppose que l'on peut l'attribuer à une famille d'hologrammes qui ne sont pas enregistrés dans un matériau photosensible traditionnel mais qui utilisent une vidéo-caméra CCD ou CMOS (*) pour l'enregistrement des images holographiques. Il s'agit donc plus précisément d'une méthode d'enregistrement que d'un type d'hologramme.

(*) *CCD et CMOS* sont des types de capteurs utilisés dans les vidéo-caméras numériques. CCD désigne une famille de capteurs photographiques basés sur un dispositif à transfert de charges (*charge coupled device*). Ils sont très largement utilisés dans les appareils photographiques et caméras commerciales. CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*) est un *composant électronique photosensible* principalement composé de photodiodes fournissant des images numériques. Il remplace de plus en plus souvent les CCDs dans les appareils courants, notamment les appareils de type reflex dans lesquels il équivaut à la pellicule argentique.
https://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur_photographique

- *Estampes* : fort probablement pour (hologrammes) estampés (ou estampillés), traduction de « *embossed holograms* ». On a utilisé l'anglicisme « *embossés* » pendant quelques temps. Le terme désigne une famille d'hologrammes qui a beaucoup de succès. Ils sont souvent utilisés dans la publicité mais aussi dans la lutte contre la contrefaçon : la plupart sont de petits *hologrammes irisés* tels ceux que l'on trouve sur les cartes de crédit ou les emballages. On les appelle communément « *hologrammes arc-en-ciel* » (*Rainbow Holograms*). On pourrait les considérer comme des pseudo-couleurs puisque les couleurs observées ne correspondent pas à la réalité mais simplement à la décomposition spectrale de la lumière blanche qui les éclaire.

L'appellation « estampe » fait référence au mode de production de ces hologrammes par estampillage d'une matrice « hologramme en relief de surface », le plus souvent dans une feuille de plastique, par un processus analogue à celui utilisé en lithographie ou en imprimerie. On crée ainsi une copie de l'hologramme superficiel qui peut être reproduit un grand nombre de fois.

Les photo-résines permettent d'enregistrer d'excellents hologrammes en microrelief de surface dont on réalise une empreinte par une technique de dépôt métallique appropriée ou par électrodéposition. La copie métallique sera la matrice.

Ce type d'hologramme peut être de transmission ou de réflexion. En pratique, ce sont surtout les hologrammes de réflexion, plus faciles à lire en lumière blanche, qui donnent les meilleurs résultats. Il s'agit sans doute du type d'hologrammes le plus répandu dans la vie courante puisque l'on peut le rencontrer dans de nombreux domaines, fort divers, depuis leur apparition dans les années '80. Ils sont souvent de piètre qualité mais ont l'avantage d'être très difficilement copiables.

· *Stéréogrammes* : bien qu'il s'agisse d'images 3D, les stéréogrammes ne sont pas des hologrammes mais des images calculées par ordinateur reproduisant un motif, comme du papier peint, mais dont les éléments du motif sont légèrement déformés d'une façon qui dépend du relief que l'on cherche à faire apparaître¹⁰.

10. Steve Perry, *Another Dimension*, 21st Century Publishing, Los Angeles – USA (1994)
Daniel Sillescu, *The Magic PC Stereogram Book*, SYBEX Verlag GmbH – Germany (1994)



Figure 5 – Autostéréogramme

Un autostéréogramme est un stéréogramme d'une image en deux dimensions qui donne l'illusion d'une scène en trois. Il n'est pas toujours aisé de percevoir le relief « caché ». Un « petit conseil » pour vous y aider : regardez l'image sans vous concentrer sur rien. Après un moment l'image commencera à changer, continuez à vous détendre, vos yeux feront le reste. Lorsque l'image apparaît pour la première fois, vous n'en voyez généralement qu'une partie. Continuez à observer avec le même regard détendu et le reste de la scène apparaîtra¹⁰

<http://astucesplanete.over-blog.com/article-34805200.html>
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Autost%C3%A9r%C3%A9ogramme>

Pour percevoir le relief il faut que chaque œil soit dirigé vers un motif différent ce qui est contraire à notre mode de vision « normal » où nos deux yeux convergent vers un même point. Un autostéréogramme est un stéréogramme constitué d'une seule image qui donne l'illusion d'une scène en 3D à partir d'une image 2D . . . et au prix d'un effort oculaire de convergence et de mise au point dissociée de l'accommodation.

L'absence de « connexion » du procédé avec l'holographie m'entraîne à supposer que les « questionneurs » pensent à un autre type de dispositifs : les *Multiplex*.

- *Multiplex Holographiques* : ce sont des dispositifs holographiques qui utilisent la vision stéréoscopique en même temps que la production du relief par holographie.

En réalité, il ne s'agit pas d'un mais de plusieurs centaines, voire un millier d'hologrammes enregistrés les uns à côté des autres de manière à former un cylindre de quelques dizaines de centimètres de diamètre. Chaque hologramme se présente sous la forme d'un trait vertical d'une trentaine de centimètres de long et de plus ou moins deux millimètres de large. La longueur correspond à la hauteur du cylindre. L'intérêt de cette disposition est double. Elle permet de bénéficier de la propriété qu'ont les hologrammes de contenir en chacun de leurs éléments de surface dS , aussi petit soit-il, l'entièreté des informations contenues dans la scène holographiée telle que vue « au travers » de dS . Il résulte de cette caractéristique que les « hologrammes linéaires » verticaux vont restituer l'information 3D verticale ce que l'on peut aisément observer en balayant le cylindre du regard, verticalement, de haut en bas ou inversement. On notera encore que chaque hologramme est différent de ses voisins parce qu'il résulte de l'enregistrement holographique d'une image 2D d'un film cinématographique. Les hologrammes qui se succèdent donc selon une distribution horizontale correspondent à une succession de scènes légèrement « décalées » que l'on peut visionner en tournant autour du cylindre (ou en faisant tourner le cylindre autour de son axe vertical).

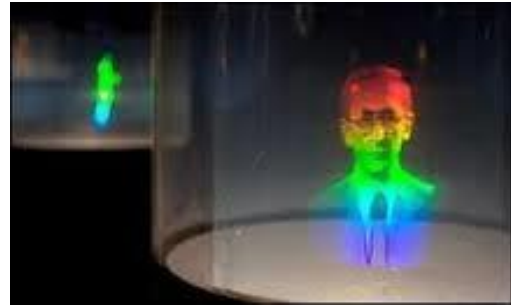
La vision binoculaire « finit le travail » si vous me permettez l'expression, en ajoutant la *stéréoscopie horizontale* qui permet de lire un grand nombre d'hologrammes en même temps. On obtient ainsi une image 3D en « pseudo-couleurs » qui semble flotter à l'intérieur du cylindre lorsqu'il est éclairé de l'intérieur en lumière blanche. Chaque hologramme est du type « arc-en-ciel ».

Le « léger décalage » des scènes qui se succèdent horizontalement entraîne la perception d'un mouvement lors de la rotation du cylindre (ou autour du cylindre fixe) selon un processus analogue à celui produisant le mouvement en cinématographie si ce n'est qu'ici la persistance rétinienne associée au défilement rapide des images est remplacé par la lecture simultanée d'un grand nombre d'images contigües. Le processus d'enregistrement de ce type de « dispositifs holographiques » est assez complexe et nécessite une excellente maîtrise de la méthodologie et de la technique holographiques. La Maison de la Science en propose une belle collection : il doit y avoir un cowboy sur un cheval qui se cabre, une dame qui envoie des baisers et un extrait du film « *Pinot simple flic* » (Gérard Junot).

Figure 6



a. Estampe : exemple d'hologramme de sécurité très difficile à contrefaire ¹¹



b. Multiplex Holographique sur cylindre ⁷



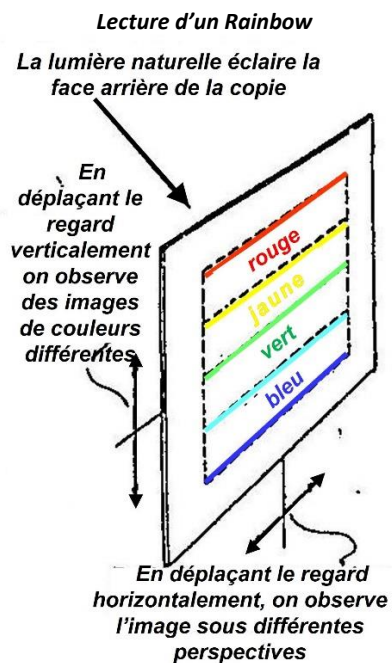
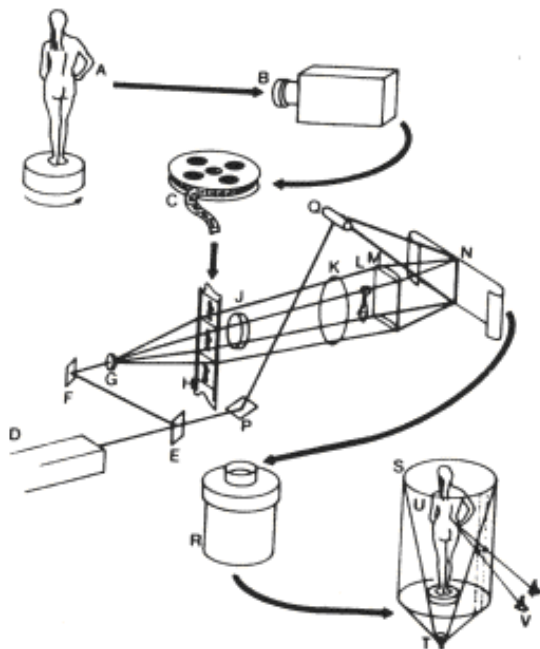
© Jonathan Ross / Hologrammes créés par la Multiplex Comp

© Musée de l'Holographie - Paris

c. Stéréogramme holographique (vers 1970) : Le « Baiser I » est enroulé autour d'un cylindre. Lorsqu'on tourne autour du cylindre, on voit les images ci-dessus qui se succèdent, en relief ¹¹

Figure 7 – Multiplex « arc-en-ciel »

Schéma de l'enregistrement d'un Multiplex



1^{re} étape - **enregistrement cinématographique** : la caméra B tourne autour du sujet A, C est le film développé
 2^e étape - **enregistrement du Multiplex** : chaque image H du film C est enregistrée pour donner une image holographique linéaire verticale N sur un film photosensible R. Les images H défilent l'une après l'autre du haut vers le bas et le film R est

11. Sean F. Johnston, *L'épopée de l'Holographie*, Pour la Science, 414 (avril 2012), 9 pages

légèrement déplacé latéralement après chaque exposition pour que les différents hologrammes N se disposent les uns à côté des autres. Le **dispositif holographique** comporte un LASER D, une lame séparatrice E, un miroir F et un système de projection composé des lentilles G, J et d'une lentille collimatrice K donnant une image réelle L. Une lentille cylindrique M forme une « image linéaire verticale » N du sujet. L'ensemble précédent constitue la « branche objet » du dispositif holographique. Le faisceau de référence est véhiculé par le miroir P vers un miroir cylindrique Q étalant verticalement le faisceau qui interfère avec l'image linéaire N. L'interférogramme résultant de l'interférence entre les deux faisceaux est enregistré dans l'épaisseur du substrat R.

3^e étape – **lecture du Multiplex** : une fois exposé, le film R est traité (développé et blanchi s'il s'agit d'un film AgHal) pour donner le Multiplex holographique S qui est enroulé sur un support cylindrique transparent sur 360°. Lorsqu'un faisceau de lumière blanche T éclaire S par-dessous, un observateur latéral perçoit une image virtuelle U du sujet « flottant » à l'intérieur du cylindre. Le relief vertical est holographique et de type « rainbow » par son mode de production, alors qu'horizontalement chaque œil V voit l'image au travers de bandes verticales différentes, donnant ainsi un effet de parallaxe stéréoscopique horizontale.

En résumé : les *Multiplex Holographiques* (ou *Hologrammes Multiplex*) sont généralement constitués d'hologrammes « arc-en ciel » fonctionnant en transmission puisque la source de lumière (blanche) est disposée derrière le film (le cylindre est éclairé de l'intérieur et par le bas pour que la lampe n'éblouisse pas le spectateur) et les images sont regardées « à travers » alors que les *estampes* appartiennent à la même famille d'hologrammes mais fonctionnent le plus souvent en réflexion.

Revenons à la *double* et à la *multi-exposition* : ce sont des techniques utilisées en *interférométrie holographique*.

- *L'interférométrie holographique* est une extension des techniques interférométriques classiques dans laquelle l'une au moins des composantes est un hologramme¹². Il s'agit d'un ensemble de techniques le plus souvent utilisées dans l'industrie qui permet de comparer un objet, ou l'hologramme de l'objet enregistré dans un « état » donné à un (autre) hologramme du même objet dans une autre « état », légèrement différent du premier : par exemple dans deux positions légèrement décalées. Légèrement signifie « très peu » : les déplacements ou déformations considérés sont micrométriques, voire nanométriques.

Contrairement à la photographie, l'holographie permet d'enregistrer plusieurs hologrammes superposés dans un même substrat sans que les différentes images se brouillent, pour autant que les décalages restent microscopiques. Un processus de moirure résulte de la superposition, moirure qui permet par exemple d'étudier les déformations subies par un objet contraint de manière connue. La méthode s'avère extrêmement intéressante pour l'étude et l'analyse des structures dont elle permet notamment de déterminer les modes propres de vibrations, fournir une carte des déformations et contraintes « montrant » les points faibles ou détecter des défauts structuraux (par exemple de matériaux composites), et finalement d'extraire de nombreux paramètres mécaniques utiles en résistance des matériaux et des structures. La précision est de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière utilisée. Une variante permet d'effectuer des relevés 3D à distance, sans contact⁷. Nous y reviendrons.

Par sa facilité relative de mise en œuvre et son faible coût d'investissement, l'interférométrie holographique¹³ occupe une place de choix aux côtés des autres techniques de tests non-destructifs telles l'échographie, rayons X, méthodes acoustiques, caméras infra-rouge,

Plusieurs approches sont possibles.

- *L'interférométrie holographique en temps réel* : dans cette technique, l'hologramme de l'objet analysé est replacé très exactement dans la position qu'il occupait lors de l'enregistrement. Quand il est rééclairé par le faisceau de référence utilisé pour l'enregistrement, l'image virtuelle de l'objet

12. Etienne Renotte, Yvon Renotte et Yves Lion, *Turbine blade vibrational behavior tested by time average holographic interferometry*, Opto 91 - 11th European Symposium on Optoelectronics, Paris, France, (26-28 March 1991), ESI Publications, Paris (1991), 300-306

Etienne Renotte, *Visualisation des modes propres d'une aube par interférométrie holographique*, Euro. J. Mech. Eng. 36 (2) (1991), 115-125 ; <http://hdl.handle.net/2268/262737>

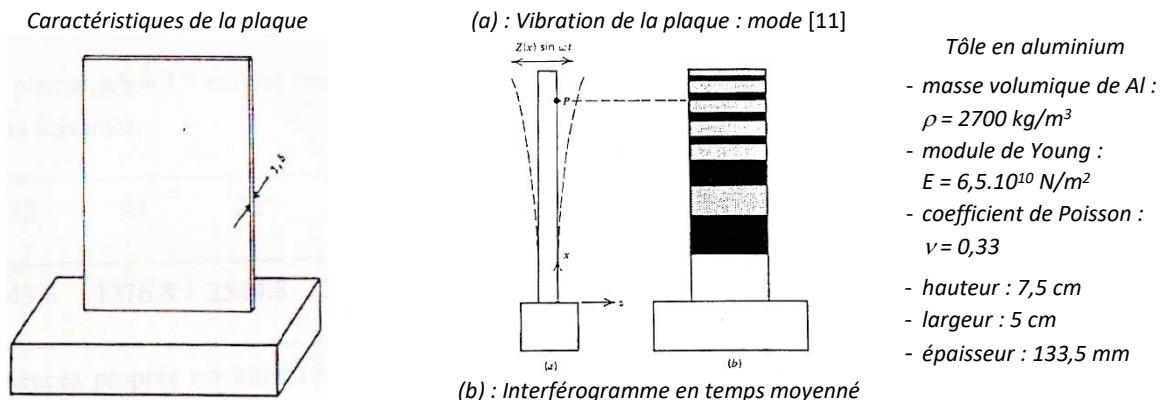
13. Paul Smigielski, *Holographie industrielle*, Teknea s.a. Toulouse (1994), 89-269

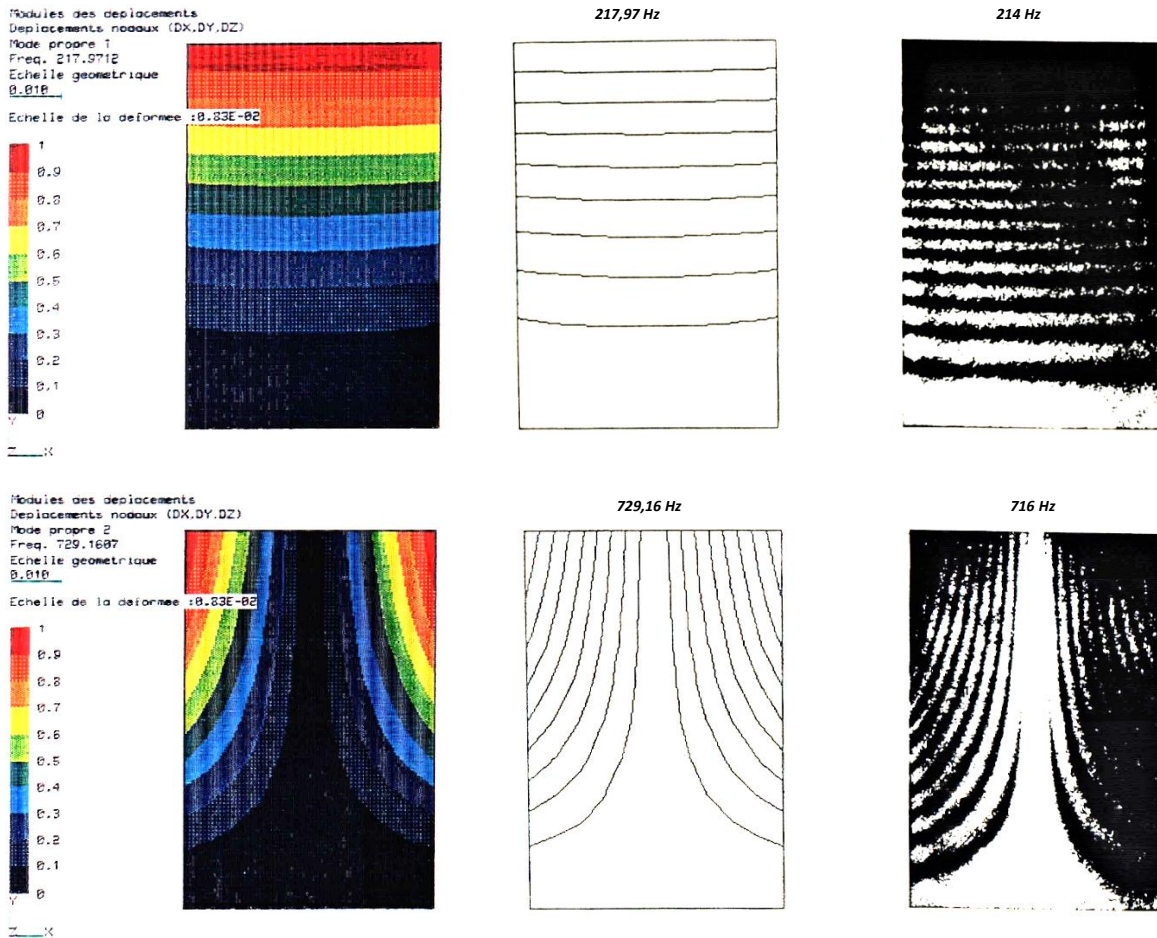
- « coïncide » avec celui-ci. Si la forme de l'objet a été modifiée entretemps, deux fronts d'onde légèrement différents se superposent dans la zone d'observation, l'un correspondant à l'objet dans sa forme initiale, l'autre étant fourni par l'objet légèrement déformé. L'image de l'objet apparaît couverte par un système de franges fournissant une carte des modifications subies par l'objet. La technique permet une observation en « temps réel » mais présente de nombreuses difficultés de mise en œuvre ne fut-ce qu'en raison de la nécessité de recalibrer le plus exactement possible l'hologramme, « micrométriquement parlant ». Le risque de « fausses franges » produites par un défaut de repositionnement même très léger, est très grand. Le recours à l'enregistrement numérique permet de contourner ce problème, sous certaines conditions. [voir § « ESPI et DESPI »]
- *L'interférométrie holographique par double exposition* : on peut éviter, du moins partiellement, les problèmes inévitables à la méthode précédente en ne comparant pas l'objet à son image holographique initiale mais deux hologrammes de l'objet dans des « états » légèrement décalés, enregistrés dans le même substrat. On évite ainsi les éventuels problèmes de recalage évoqués supra puisque les deux fronts d'onde sont toujours reconstruits dans une position relative exacte. Le système de franges révèle les modifications de forme de l'objet survenues entre les deux expositions. Généralement, la première exposition est effectuée avec l'objet non déformé, la seconde sur l'objet mis en charge. *L'interférométrie par double exposition est beaucoup plus facile à réaliser que celle en temps réel.*
 - *L'interférométrie holographique en temps moyenné* : par effet stroboscopique ou moyennage temporel, il est possible de visualiser la déformée de la surface d'un objet en vibration sous forme d'un système de franges différent de celui évoqué aux paragraphes précédents, se superposant à l'image holographique de l'objet. L'étude théorique permet d'interpréter la signification physique de ces franges correspondant à des lignes d'égale amplitude de vibration. La méthode est particulièrement adaptée à l'étude des mouvements périodiques. Elle consiste à enregistrer un hologramme unique de l'objet en vibration pendant une durée beaucoup plus longue que la période de vibration appliquée. L'hologramme ainsi obtenu peut être considéré comme la superposition d'un très grand nombre, voire une infinité de poses correspondant aux différents états de l'objet pendant le mouvement. [voir exemples page suivante]

Dans le souci déclaré de ne pas « entrer à ce stade » dans des développements analytiques trop importants, la théorie relative aux processus précédents ne sera pas abordée ici. [voir § « Interférométrie »]

Figure 8
Visualisation des modes propres de vibration d'une plaque rectangulaire
par interférométrie holographique en temps moyenné

Comparaison avec les valeurs calculées par le logiciel SAMCEF (Système pour l'Analyse des Milieux Continus par la méthode des Eléments Finis, Dépt. Mécanique – Uliege)¹²





c. **Modules des déplacements de la plaque** calculés par SAMCEF : allures des déformées (l'amplitude des vibrations est micrométrique, de l'ordre de 1,5 à 2 μm)
 Les fréquences propres sont calculées [rappel : 1 Hz = 1 s^{-1}]
 L'écart entre les fréquences calculées et mesurées est de 2% ce qui est relativement bon (la modélisation ne tient pas compte des fixations)

d. Photographies des **interférogrammes holographiques** correspondants – excitation mécanique sinusoïdale par un « shaker » (vibreux électro-mécanique)
 Les fréquences sont mesurées

Seuls les deux premiers modes [11 et 12] sont illustrés pour éviter de « surcharger » la présentation

11 : 1^{er} mode propre = 1^{er} mode transverse ; 12 : 2^e mode propre = 1^{er} mode transverse – torsion

Hors franges, les zones claires sont des nœuds (fixes : ligne d'attache en bas des figures), les zones sombres des ventres (amplitudes maximales : arête supérieure de la plaque)

Notons que **les franges observées** dans les processus précédents **sont des systèmes secondaires de franges résultant de la superposition de deux ou plusieurs systèmes primaires de franges d'interférences**, bases du processus holographique. **L'ensemble de franges observé constitue donc une figure de Moiré (optique)** ¹⁴.

Je suppose que la technique de « temps moyenné » correspond à ce que les « questionneurs » appellent « multi-exposition ». Un doute subsiste toutefois : il est possible que la technique de double exposition évoquée fasse référence à un procédé d'enregistrement des hologrammes en deux temps, procédé qui fournit des *images holographiques* très spectaculaires *qui paraissent sortir du substrat*. On les appelle « *hologrammes de deuxième génération* ».

14. Nils Abramson, *Light in Flight or The Hologram – The Columbi Egg of Optics*, Chap. 6 – *Holographic Interferometry* : 6.1 – *Moiré Pattern Analogy*, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham – Washington USA (1996), 162-184
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Moir%C3%A9_\(physique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Moir%C3%A9_(physique))

La technique d'enregistrement consiste à « enregistrer l'hologramme d'un hologramme », du moins est-ce une manière raccourcie de décrire le procédé.

Pratiquement, on enregistre un premier hologramme de l'objet de manière « classique », généralement un hologramme en transmission. En se référant au schéma de lecture de ce type d'hologramme, nous avons vu qu'il est possible d'obtenir une image réelle de l'objet moyennant quelques aménagements (éviter que cette image soit « noyée » dans le faisceau de lecture, ce qui la rendrait illisible, et n'est pas une condition évidente à rencontrer). Un montage approprié permet alors d'enregistrer une image holographique H_2 de l'image réelle H_1 donnée par le premier hologramme souvent appelé *Master*. L'image réelle sert donc d'objet pour un deuxième hologramme : *on enregistre l'image d'une image ! C'est ce que l'on appelle un hologramme de deuxième génération.*

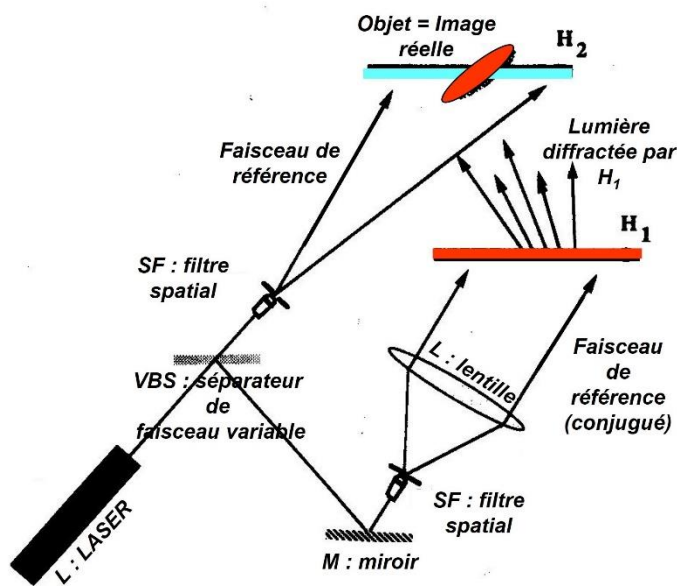


Figure 9 - Hologramme de deuxième génération

Schéma du dispositif d'enregistrement
H. Thiry et Y. Renotte - HOLOLAB

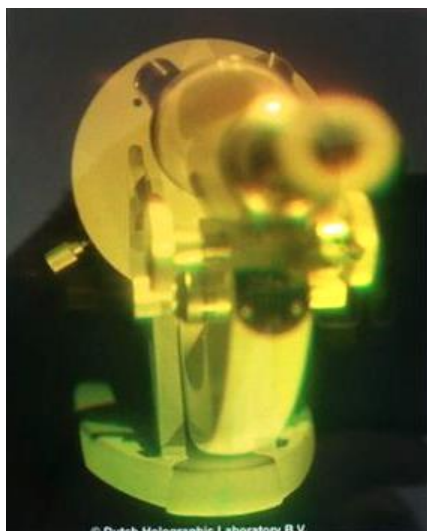


H_1 : Master
 H_2 : 2^e génération

Après traitement, H_2 présentera trois « rendus » différents : l'image holographique apparaîtra derrière la plaque, comme un « simple hologramme de réflexion », ou elle « sortira » de la plaque comme une sculpture de lumière. Le cas intermédiaire correspondant à la position « à cheval » donne une image surprenante dont une partie « sort » de la plaque sur laquelle la structure semble posée, une autre peut être virtuelle. Il est évident que l'enregistrement de ces hologrammes qui donnent lieu à des effets de reliefs exceptionnels, exige une grande maîtrise des techniques d'imagerie holographique. Certains holographistes ont réussi à construire des images « sortant » de plus d'un mètre. L'une montre un musicien jouant du trombone à coulisse, élément de l'image de l'instrument « sortant » d'environ un mètre. Elle a longtemps été exposée au *Palais de la Découverte à Paris*.

Selon les positions relatives de H_1 par rapport au substrat d'enregistrement que nous appellerons « la plaque » pour simplifier (il a longtemps s'agit d'une plaque photographique préparée pour l'enregistrement holographique [voir § « Matériaux pour l'enregistrement holographique »]), trois situations peuvent intervenir : soit H_1 est située devant la plaque, soit « à cheval » sur la plaque, soit derrière celle-ci.

Figure 10 – **Hologramme de deuxième génération** : réalisé par Walter Spierings - Holographiste néerlandais (années 1980)



a. © Dutch Holographic Laboratory B.V.



b. © Catawaki

a. Photographie de l'Hologramme d'un microscope sur plaque de verre : met très bien en évidence l'effet holographique de relief « sortant »

b. Photographie de l'image d'un circuit électronique intégré disposé sur la platine du microscope, visible au travers de l'image du tube en disposant l'œil à l'extrémité - image de l'oculaire

[2] *Candide* - « Pouvez-vous définir les termes suivants : gélatine dichromatée, multimédia, pseudo-couleur, double exposition, multi-exposition, le tout associé à l'hologramme de réflexion ? Ensuite : stéréogrammes, vidéo-hologrammes, estampes, associés aux hologrammes de transmission ? »

Le physicien - Il est surprenant que les questions posées soient quasiment les mêmes que les précédentes. La redondance des questions apporterait-elle la preuve de ce que nous suspectons : la démonstration d'une grande confusion entourant la perception des notions relatives à l'holographie ? Ayant répondu à toutes les questions, je pourrais passer à la question suivante mais puisque l'occasion m'est donnée de pouvoir approfondir certains aspects, même s'ils ont déjà été abordés, je vais en profiter.

- *Gélatine « dichromatée »* : rappel : il faut dire « bichromatée », c'est un matériau d'enregistrement et non un type, ni une catégorie d'hologrammes.

- *Pseudo-couleurs* : rappel : ce sont des hologrammes qui donnent lieu à une irisation (décomposition spectrale) lorsqu'ils sont lus en lumière blanche, ce qui est normal puisque « physiquement », les hologrammes sont des réseaux. J'ai signalé que tous les hologrammes, de transmission et de réflexion, sont enregistrés en lumière cohérente monochromatique, fournie par un LASER. Les images holographiques auront donc la couleur du rayonnement monochromatique utilisé lors de la construction lorsqu'ils sont lus avec la même source. C'est d'ailleurs la seule manière de lire correctement les hologrammes de transmission, avec un LASER.

Toutefois, les hologrammes de réflexion, du moins dans certaines conditions, peuvent être lus en lumière blanche. Ils sélectionnent eux-mêmes la longueur d'onde « utile » pour leur lecture dans le spectre de la lumière blanche : « physiquement », ils se comportent en filtre interférentiel (réseau de Bragg). Lorsqu'ils sont enregistrés dans des émulsions argentiques à l'aide d'un LASER HeNe (rouge), ils apparaissent jaunes – verdâtres après traitement, parfois rougeâtres selon les conditions de développement.

Théoriquement, ils devraient avoir la couleur du rayonnement utilisé lors de l'enregistrement : rouge s'il s'agissait d'un LASER hélium-néon. Le déplacement en couleur du rouge vers le jaune – vert, dans le cas considéré, est dû au fait que *la gélatine*, base de plusieurs matériaux d'enregistrement (émulsions argentiques AgHal et gélatines bichromatées DCG), a tendance à se rétracter, à se contracter lors des développements et post-traitements physico-chimiques appliqués. La distance entre les « strates » qui constituent le réseau holographique enregistré, diminue sous l'action de cette contrainte et le réseau va sélectionner dans la lumière blanche, une longueur d'onde plus petite que la longueur d'onde utilisée à l'enregistrement. Dans le cas considéré, on passe du rouge au jaune – vert [Figure 4.c – Hologrammes de réflexion, H. Thiry et Y. Renotte]. On observerait un « glissement » spectral du vert vers le bleu - vert si l'on avait enregistré dans le vert avec un LASER à argon ionisé.

- *Double et multi-exposition, vidéo-hologrammes* : les trois termes ont été longuement expliqués dans les réponses à la première question. De même pour les *stéréogrammes* qui sont en réalité constitués d'un très grand nombre d'hologrammes « arc-en-ciel linéaires » très minces, disposés verticalement côte à côte. Ils utilisent la vision stéréoscopique afin de permettre la perception horizontale du relief alors que la verticale est holographique.

- *Les estampes* sont des hologrammes très courants obtenus par estampillage, « pressage » à chaud dans une feuille de plastique, d'un hologramme enregistré en microrelief de surface sur un substrat métallique. Le procédé permet de produire un grand nombre de copies de la matrice. Une famille de matériaux photosensibles s'avère bien adaptée pour l'enregistrement d'hologrammes en relief de surface : *les photorésines*.

[3] *Candide* - « *Quels sont les hologrammes qui donnent l'impression de mouvement ? Qu'est la double exposition, la multi-exposition, un stéréogramme, un vidéo-hologramme ?* »

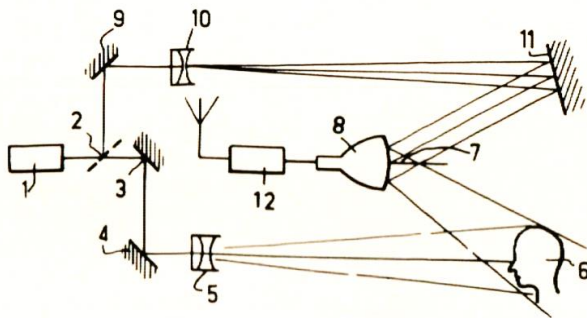
Le physicien – La seconde partie de la question a été commentée longuement ci-avant. Nous nous intéresserons donc principalement à la première : *les hologrammes qui donnent l'impression de mouvement*.

A ma connaissance, seuls les *stéréogrammes* sont capables de donner une impression de mouvement parce qu'ils sont constitués non pas d'un hologramme d'une scène statique, mais d'un ensemble d'images hologrammes d'une même scène, objet(s) ou personnage(s), dans des positions (distribution géométrique et perspective) légèrement différentes lorsqu'on passe d'un hologramme à son voisin, de la même manière qu'au cinéma en passant d'une image à la suivante [Figures 6 et 7]. Le dispositif étant conçu pour que nous voyons plusieurs images holographiques en même temps puisque notre champ de vision est beaucoup plus large que chaque hologramme (linéaire et vertical), nous créons nous-mêmes le mouvement par simple déplacement horizontal transversal en face du stéréogramme.

Vous allez me rétorquer « *oui mais il y a des vidéo-hologrammes !* ». On peut raisonnablement imaginer que certaines sociétés ont essayé de « faire de la vidéo en relief » et je peux vous dire que *la vidéo en relief, de type holographique, existe . . . mais au stade expérimental*. A ma connaissance, des laboratoires tels que *Thompson* en France et aux Etats-Unis ou *Philips* en Europe, ont exploité les propriétés remarquables de l'holographie pour réaliser le procédé le plus perfectionné possible pour la télévision en trois dimensions, et ce dès le début des années 1970¹⁵ [Figure 11].

15. Marc Chauvierre, *La télévision en relief - 3DTV*, éditions techniques et scientifiques françaises (1978)

Figure 11 - Télévision holographique ¹⁵



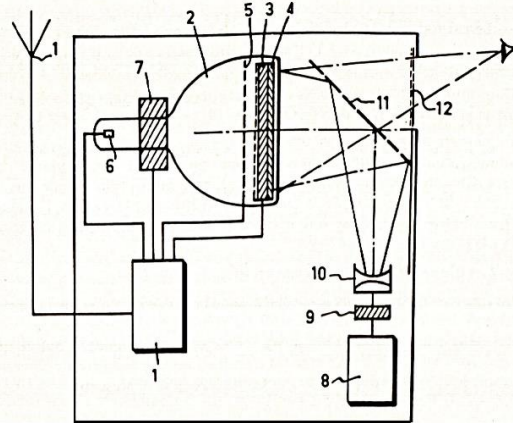
Principe d'un dispositif d'enregistrement et d'émission

1. LASER, 2. lame semi-transparente, 3, 4, 9 et 11 : miroirs, 5 et 10 : lentilles divergentes, 6 : objet, 7 : surface photosensible du tube 8 analyseur d'images (type plumbicon ©), 12 : système conventionnel d'amplification et d'émission

[il est supposé que les problèmes de finesse du spot d'analyse et de la bande passante (infiniment plus grande que pour une image de télévision normale) sont compatibles avec la distance interfrange de l'interférogramme]

Aujourd'hui, les tubes transducteurs lumière – courant et inverse sont remplacés par des éléments semi-conducteurs LCD et CMOS pour les premiers, LCD (affichages à cristaux liquides) et écrans LEDs, OLEDs et QLEDs pour les seconds

*) **Effet Pockels** : biréfringence induite par un champ électrique variable dans certains cristaux, proportionnelle à l'intensité du champ ; https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_Pockels



Principe d'un dispositif de réception

1. Système conventionnel de réception et d'amplification, 2. transducteur courant / lumière utilisant l'effet Pockels *, 3. lame monocristalline KD_2PO_4 (phosphate diacide de potassium « dopé »), 4. électrode transparente, 5. grille de modulation, 6. canon à électrons, 7. système de balayage, 8. LASER, 9. filtre polarisant, 10. lentille divergente, 11. miroir semi-transparent, 12. filtre polarisant complémentaire

Mais il n'a jamais pu être implémentée dans un système de production ou de distribution d'images par télévision pour une raison est assez simple : les systèmes de distribution de l'époque étaient insuffisants du point de vue possibilité de traitement des données pour permettre le transfert et la transmission de la quantité considérable d'informations requises par de tels systèmes. Ils sont insuffisants pour pouvoir reproduire en même temps la couleur, le relief et le mouvement, donc donner des images holographiques en mouvement était quasiment infaisable à l'aide des systèmes vidéo existants. Les moyens disponibles 15tourné » et l'étoile de l'imagerie holographique a pâli : les grandes sociétés distributrices ont préféré miser sur l'amélioration et le développement de la couleur et de la qualité des images, notamment leur définition. Ce qui ne signifie nullement que l'on n'y reviendra pas dans un avenir plus ou moins proche en raison des énormes progrès survenus au cours des dernières années et des essais qui « pointent le nez de temps à autre » dans les salons spécialisés.

Se pose alors inévitablement la question du cinéma holographique ? Il a souvent été évoqué, surtout à l'époque des débuts de l'imagerie holographique, probablement parce que certains voyaient là un moyen pour lutter contre l'entrée massive de la télévision dans les foyers en même temps que les salles de cinéma devenaient de plus en plus désertes. Il fallait trouver des alternatives et pourquoi ne pas rêver au spectateur assis au sein du spectacle, l'action se déroulant autour de lui ou du moins dans un hémicycle lui faisant face et l'entourant partiellement, à la manière des théâtres romains ? Des salles expérimentales existent mais se limitent à des parcs dédiés aux « techniques d'imagerie avant-gardistes » comme le Futuroscope à Poitiers (France). En dépit de plusieurs annonces de superproductions en cinéma holographique surtout par des producteurs soviétiques, dans les années 1970-80, la ciné-holographie n'a pas « percé », un peu pour des raisons analogues à celles qui ont empêché l'avènement de la télé-holographie : des techniques d'imagerie alternatives plus « faciles à mettre en œuvre » et moins coûteuses sont apparues et se sont développées au détriment des processus holographiques. Ce furent le cas du cinémascope et de la vistavision qui avaient envahi les

salles dès la fin des années 1950, du cinérama et de ses variantes, moins chanceux, et plus récemment du cinéma 3D, basé sur des techniques stéréoscopiques [voir § « Stéréoscopie »] qui connaît quelques beaux succès d'audience. On peut toutefois affirmer que la *ciné-holographie* existe mais est très discrète parce que difficile à produire et seulement lisible simultanément par quelques spectateurs. Autrement dit, quasiment impossible à présenter à un « grand public ».

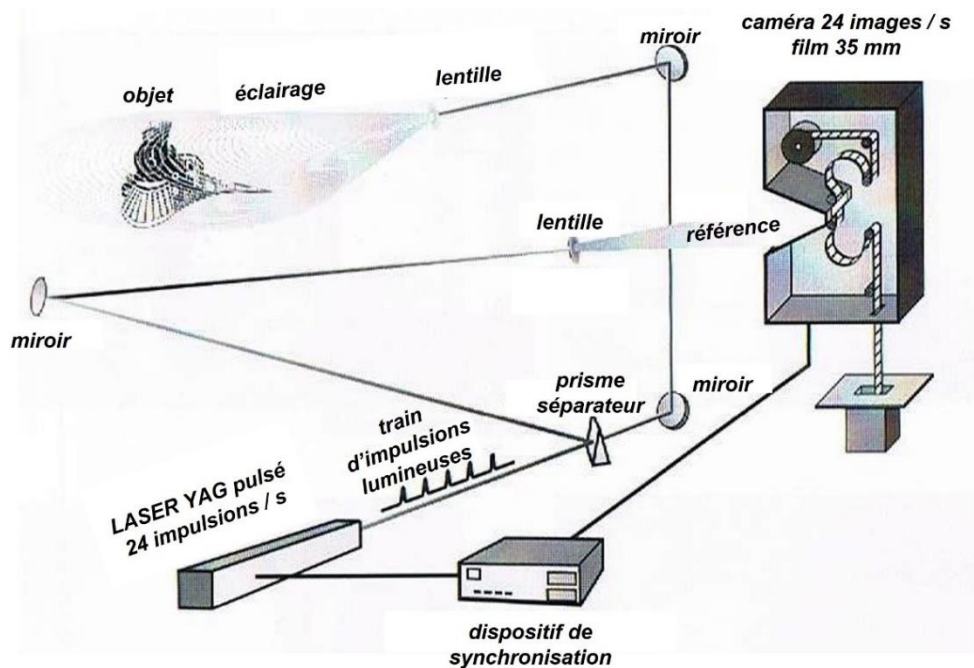
Au centre de recherches franco-allemand *Holo 3* à *Saint-Louis*, en Alsace, l'équipe du *Pr Paul Smigielski* a réalisé un dispositif de cinéma holographique dont malheureusement seulement un petit nombre de spectateurs peuvent bénéficier en même temps. Il est formé d'une série d'images holographiques lues en transmission d'une scène animée, comme les images d'un film cinématographique si ce n'est que l'image n'est pas projetée : chaque hologramme est lu individuellement. La succession des images défilant suffisamment vite pour que la persistance rétinienne joue son rôle, le spectateur visualise ainsi un film, très simple, mais réellement holographique. La méthode est relativement complexes et seuls deux courts « films » ont été produits : *Christiane et les Holobulles* (la secrétaire du laboratoire *Holo 3* soufflant des bulles de savon) et *un train - jouet mécanique* tournant inlassablement sur un rail circulaire [Figures 12 et 13]. On peut envisager d'utiliser des hologrammes de réflexion au lieu des hologrammes de transmission sans apporter d'amélioration significative. Force est donc d'accepter qu'actuellement, *seule la technique des Multiplex holographiques permet d'associer mouvement et relief de type holographique*. L'effet « arc-en-ciel » ajoute une touche de couleurs ¹⁶.

Figure 12 – **Cinéma Holographique**

Principe : réalisation d'une succession d'hologrammes sur un film à l'aide d'un LASER fonctionnant avec une cadence de répétition déterminée – ex. 25 Hz

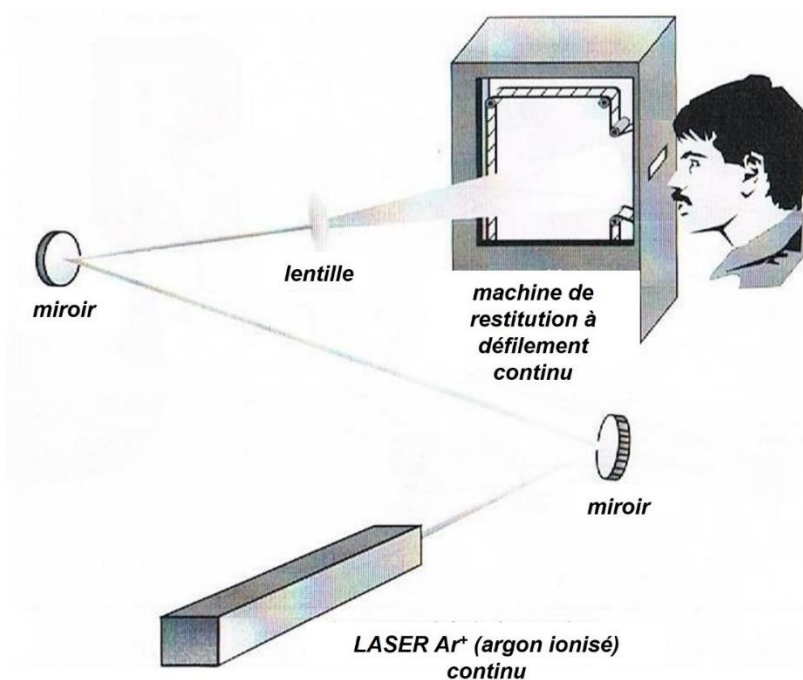
1976: V.G. Komar (URSS) a réalisé un film 70 mm – 8Hz, 1982: A.J. Decker (NASA – USA) a réalisé un film 70 mm – 20Hz

I.S.L. (Institut Franco-Allemand de Recherche – St Louis - F): 1983 - 1^{er} film 35 mm – 24 Hz, 1985: 1^{er} film holographique d'un personnage vivant: film 126 mm – 25 Hz : « *Christiane et les Holobulles* » [P. Smigielski, H. Fagot, F. Albe]



I.S.L. (1983) - Montage d'enregistrement du premier film holographique à la fréquence cinéma 24 Hz, film 35 mm

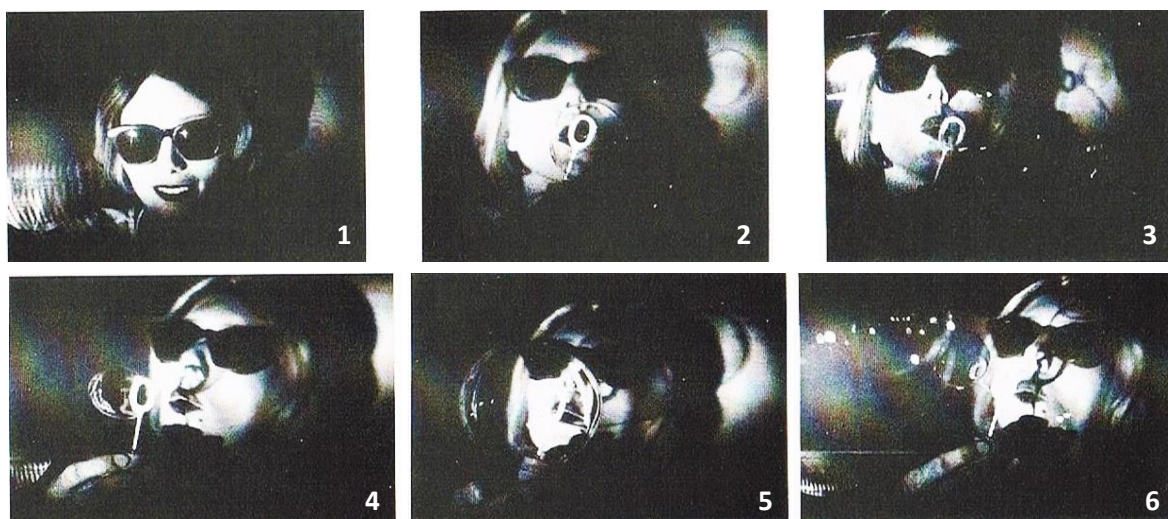
16. Paul Smigielski, *Holographie industrielle*, Teknea s.a. Toulouse (1994), 78-86



Paul Smigielski
 RHENAPHOTONICS ALSACE
 Parc d'Innovation – ILLKIRCH
 (Strasbourg) - France

Montage de lecture : format permettant une vision stéréoscopique confortable sans lunette
 Lecture à travers une fente de 10 mm de hauteur

Figure 13 – Premier film holographique d'un personnage vivant : film 126 mm – 25 Hz

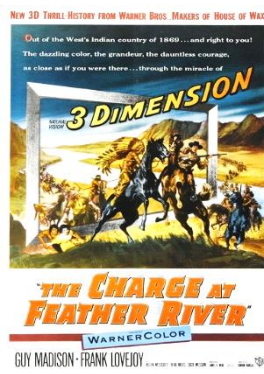


Séquence de six vues extraites du film holographique « *Christiane et les Holobulles* »
 doc. I.S.L. 1985 - P. Smigielski, H. Fagot, F. Albe

Je sais que vous avez sans doute vu des films en relief, en salles ou dans des sites comme le *Futuroscope* à Poitiers (France). Je pense notamment au très beau spectacle futuriste présenté en 3D entre 1986 et 98 dans les différents *parcs Disney* – USA (réalisé par *Francis Ford Coppola* et produit par *George Lucas*), montrant *Michael Jackson* (1958-2009) dans le rôle du *Capitaine Eo*, sorte de « spatonaute » chantant et virevoltant avec un adorable *Nounours*. Le film est réapparu en 2010, après le décès de l'artiste principal, pour disparaître à nouveau en 2015. Plusieurs films commerciaux se sont succédé depuis les années 1950, avec des réussites diverses notamment en fonction de l'évolution des techniques de production / réception du relief utilisées et de l'usage d'effets spéciaux [voir § « Stéréoscopie »].

Certains ont même été adaptés pour la télévision. Les genres *Western*, *Science-Fiction* et *Space Opera* ont « naturellement » exploité la nouvelle technique que l'on aurait dit « faite sur mesure » pour eux.

Figure 14 – Quelques films 3D : des débuts (1953) à nos jours



1953 – *La charge sur la Rivière Rouge* - Western



1953 – *Hondo, l'Homme du Désert* - Western



1954 – *Fort Ti* - Western



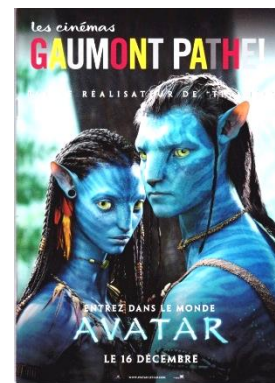
1954 – *Le Crime était presque parfait* – Suspense (Alfred Hitchcock)



1954 – *L'étrange Créature du Lac Noir* – Fantastique
1982 – version TV *



1986 – *Capitaine Vo* – Space Opera (© Disney)



2009 – *Avatar* – Science-Fiction (capture de mouvement) **



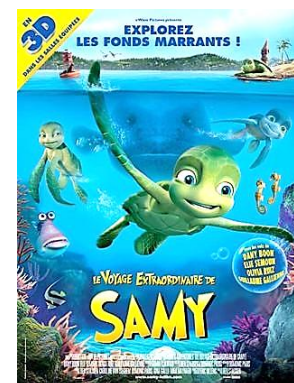
2014 – *Astérix : Le Domaine des Dieux* – Animation 3D

*) Film fantastique américain (1954) initialement tourné pour être visionné en 3D par le procédé des lunettes polarisantes, fut converti en version anaglyphe pour la télévision française (présenté le 19 octobre 1982) : des lunettes « 3D Video » (un « verre » rouge – un « verre » bleu) furent fournies par le magazine de télévision partenaire de l'opération [voir § « Stéréoscopie »].

**) Film américain de science-fiction (2009) tourné en procédé « capture de mouvement » pouvant être regardé en 3D à l'aide de lunettes alternantes à cristaux liquides.

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Capture_de_mouvement#:~:text=La%20capture%20de%20mouvement%20\(motion,mod%C3%A8le%203D%2C%20ou%20avatar\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Capture_de_mouvement#:~:text=La%20capture%20de%20mouvement%20(motion,mod%C3%A8le%203D%2C%20ou%20avatar))

Dans les premiers temps, plusieurs films furent des « nanars grandioses » principalement destinés à « tirer un maximum » de ce nouveau filon susceptible de renouveler le genre en proposant des effets aussi impressionnants que spectaculaires. Quelques excellents films ont néanmoins rencontré un réel succès d'audience commerciale, même à l'époque « héroïque » (par exemple *Hondo*, *Le crime était presque parfait*, *L'étrange créature du Lac Noir*, . . .), et jusque récemment : *Avatar 1 et 2* (2009, 2022 - films américains de science-fiction 3D tournés en capture de mouvement) et *Astérix : le Domaine des Dieux* (2014 – film d'animation 3D franco-belge). Mention spéciale au réalisateur, scénariste et producteur belge, liégeois, Ben Stassen °, fondateur de nWave Pictures qui réalise 18 films 3D entre 1997 et 2022, dont « *Fly me to the Moon* » (2008) et « *Le voyage extraordinaire de Samy* » (2010) avec Dany Boon et Elie Semoun.



- °) https://fr.wikipedia.org/wiki/Ben_Stassen
https://fr.wikipedia.org/wiki/Le_Voyage_extraordinaire_de_Samy

Figure 15 - Quelques-uns des meilleurs films à voir en 3D



1999 – *Jurassic Park*
 Saga de science-fiction
 américaine (2013 : version 3D)



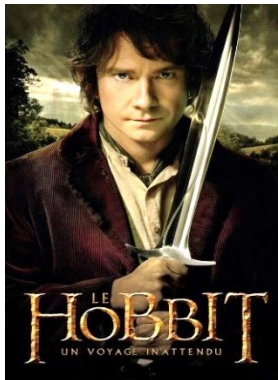
2009 – *Là-Haut*
 Long métrage américain en
 images de synthèse (Pixar)



2010 – *Tron – l'Héritage*
 Film de science-fiction
 américain



2011 – *Les Aventures de
 Tintin : Le secret de la Licorne*
 Capture de mouvement 3D
 américain - S. Spielberg



2012 – *Le Hobbit : le voyage
 inattendu*
 Film Fantasy américano-
 canadien



2013 – *Gravity*
 Ddrame spatial américano-
 britannique : 1^{er} film tourné
 en HFR 3D (48 images / s)



2021 – *Dune*
 Film américano-canadien de
 Science-Fiction



2022 – *Avatar 2 : la voie de
 l'eau*
 Film américain de science-
 fiction en HFR 3D

Dans tous ces films, le **relief** est « **purement stéréoscopique** ». Je le qualifie de « **faux relief** », sans pour autant suggérer la moindre connotation péjorative, **parce que la perspective est fixée** par l'angle choisi par l'opérateur **lors de la prise de vue** et sera immuable à la lecture. Le spectateur peut se déplacer dans la salle pendant la projection, latéralement, transversalement ou parallèlement à l'écran, il percevra toujours la même perspective quelle que soit sa position, indépendamment de l'angle sous lequel il regarde l'écran : *tout le monde voit la même chose, la même scène sous la même perspective*. Au contraire, **en holographie**, on obtient ce que j'appelle le « **relief vrai** » : quand le lecteur se déplace par rapport à un hologramme il voit **la perspective de la scène holographiée évoluer** « *comme si les objets observés étaient réellement là* ». On notera toutefois que l'hologramme étant un composant optique, il possède une *ouverture* qui détermine le champ d'observation de la scène holographiée : le plus souvent, les limites physiques de la plaque photosensible utilisée pour l'enregistrement fixeront celles de ce champ. La plaque se comporte donc comme une fenêtre au travers de laquelle on peut observer les objets holographiés ce qui explique que si l'on casse un hologramme en deux parties, on pourra continuer à voir l'entièreté de la scène au travers de chacune des moitiés mais des angles différents et des champs plus étroits comme si on disposait de deux fenêtres moitié moins grandes disposées l'une à côté de l'autre. *Ce comportement apparemment paradoxal des hologrammes est lié au fait que l'entièreté de l'information provenant de tous les points de la scène est enregistrée en chaque point du substrat photosensible sous forme interférométrique !* En imagerie, seul le processus

holographique utilise ce procédé curieux d'enregistrement qui lui confère des caractéristiques de restitutions exceptionnelles incluant le rendu de la perspective.

Figure 16 – Stéréogramme vs Hologramme

Stéréogramme
Réseau lenticulaire type
Bonnet → **perspective**
figée

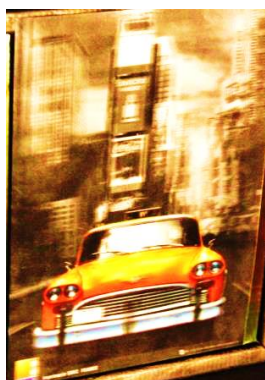


Photo vue par la droite

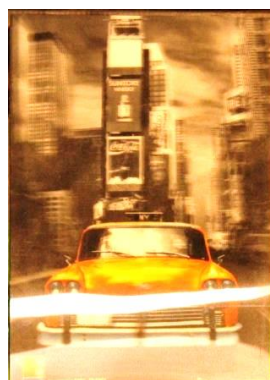


Photo vue de face



Photo vue par la gauche

Hologramme en réflexion – type Denisyuk → **perspective parfaitement respectée / reproduite** : HOLOLAB - ULiege



Photo vue par la droite

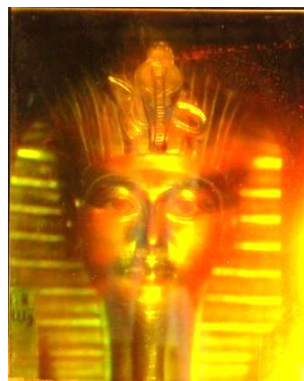


Photo vue de face

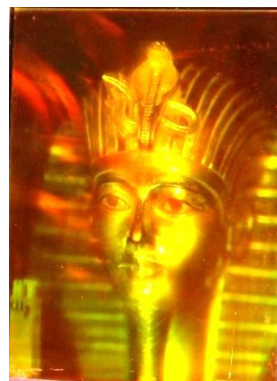


Photo vue par la gauche



Photo vue plus à gauche

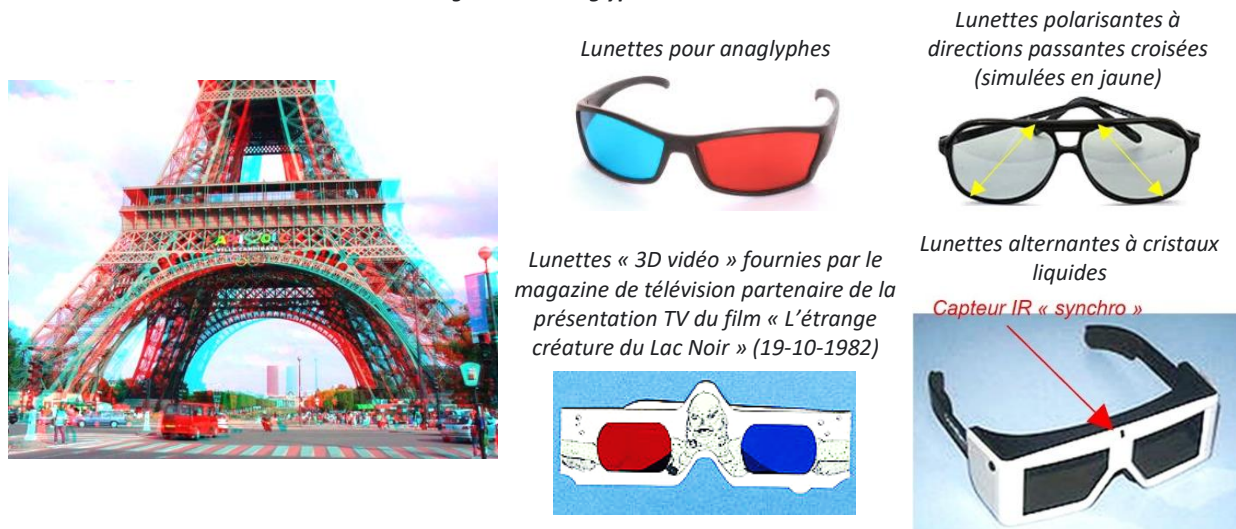
Les différences fondamentales entre reliefs holographique et stéréoscopiques étant précisées, nous allons examiner quelques méthodes utilisées pour produire celui-ci. D'une manière générale, elles sont nettement plus simples à mettre en œuvre que celles utilisées en holographie.

Toutes les techniques de stéréoscopie exploitent la vision binoculaire en utilisant un « procédé » enregistrant deux images plus ou moins décalées d'une même scène, images qui sont adressées séparément à chaque œil : l'une à l'œil droit, l'autre à l'œil gauche. Plusieurs dispositifs existent, certains presque aussi anciens que la photographie argentique ont plus d'un siècle [voir § « Stéréoscopie »]. Les premiers films 3D ont utilisé la méthode des **anaglyphes** pour séparer les images. *Un anaglyphe est une image composée de deux photographies différentes d'une même scène.* Les deux photographies sont prises selon des points de vue légèrement décalés et chacune au travers d'un filtre différent : l'un rouge, l'autre bleu ou vert. Les deux images sont superposées et apparaissent plus ou moins décalées selon l'importance du relief. La technique permet de restituer le relief en adressant chaque image colorée à un œil via une paire de lunettes dont un verre est rouge et l'autre bleu ou vert. La technique a également été utilisée en télévision (cf. supra).

Le procédé a progressivement été supplanté par le remplacement des verres colorés par des **filtres polariseurs** (à l'enregistrement et à la lecture) dont les plans de polarisation sont croisés, système permettant une bonne restitution des couleurs ce qui n'était pas le cas des anaglyphes. Le film *Capitaine Vo* utilisait cette technique. Aujourd'hui, on recourt à des moyens nettement plus sophistiqués : **les lunettes à cristaux liquides alternativement passantes d'un côté et bloquées de l'autre**, strictement synchronisées par infra-rouge avec le défilement des images afin d'éviter des effets de papillotement. Le choix d'une fréquence correcte de synchronisation permet une excellente perception du relief tout en conservant les qualités des images colorées. Le processus donne

d'excellents résultats : de très beaux films stéréoscopiques, très spectaculaires (cf. *Avatar* pour ne citer que celui-là) qui présentent néanmoins « l'inconvénient » de nécessiter des lunettes adaptées permettant leur vision. L'holographie permettrait d'affranchir le lecteur de cette contrainte. Malheureusement, comme signalé précédemment, les contraintes de l'enregistrement et de la restitution holographiques empêchent (encore) de produire des films commercialement exploitables, susceptibles de concurrencer « leurs cousins » stéréoscopiques.

Figure 17 – Anaglyphes et lunettes 3D



Avant de terminer, je voudrais revenir sur la notion de *vidéo-hologramme* pour la préciser et peut-être compléter les informations précédentes y relatives. En effet, j'ai signalé que dans la pratique on enregistre certains types d'hologrammes, ou plutôt d'interférogrammes pour être précis, avec des caméras CCD et CMOS et on appelle parfois la technique *vidéo-holographie*. Elle intervient le plus souvent dans des applications industrielles, notamment en métrologie optique. Aux laboratoires (*HOLOLAB* et Centre Spatial de Liège), nous utilisons des variantes adaptées aux conditions de travail et aux résultats recherchés : l'*ESPI* (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*) et la *DESPI* (*Digital Electronic Speckle Pattern Interferometry*)¹³. Des cristaux photoréfractifs¹⁷ utilisés comme matériau d'enregistrement permettent l'enregistrement et l'effacement successifs de séries d'interférogrammes dans un même « milieu photosensible », les images étant numérisées au fur et à mesure et stockées sur des supports digitaux. *On pourrait donc dire que la technique de vidéo-holographie existe, mais elle réservée à des applications rarement disponibles pour le grand public.*

Permettez-moi d'émettre quelques considérations supplémentaires à propos des *techniques de double et multi-exposition*. On utilise quelques fois l'appellation pour désigner des hologrammes display particuliers. Le plus souvent, ce sont des hologrammes de réflexion qui présentent l'avantage de pouvoir être lus en lumière blanche. Ils exploitent la propriété « curieuse » de l'holographie déjà évoquée qui permet d'enregistrer plusieurs hologrammes distincts dans un même support photosensible à condition de les séparer nettement, par exemple en modifiant de quelques degrés l'angle du faisceau de référence entre les différentes prises de vue. La méthode dite d'*hologrammes couplés* est abondamment utilisée pour le *stockage holographique de données*.

En imagerie, je me souviens avoir vu un exemple spectaculaire : il montrait les trois singes de la sagesse qui apparaissent et disparaissent l'un après l'autre lorsque le spectateur se déplace latéralement en face de l'hologramme, l'image de chacun des individus correspondant à une parallaxe donnée

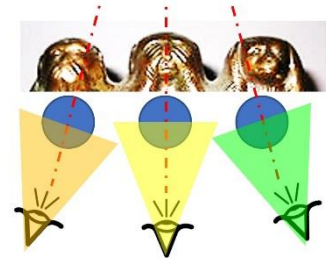
17. Gilles Pauliat et Gérard Roosen, *L'optique non-linéaire et ses matériaux – L'effet photoréfractif*, EDP Sciences (Edition, Diffusion, Presse Sciences – France, [EDP Sciences - Accueil](#)) / Collection de la Société Française d'Optique, 66 (1998), 235-332

(direction du faisceau de référence), utilisée pour son enregistrement. Si les angles séparant les prises de vues ne sont pas « suffisamment grands », deux (ou plusieurs) images pourraient être lues en même temps.

Figure 18 – **Les trois singes de la sagesse**

Maxime asiatique reprise par Gandhi (1869-1948)

- Celui qui ne dit rien
- Celui qui ne voit rien
- Celui qui n'entend rien



NB. Les couleurs n'ont pas de sens, elles matérialisent simplement les champs de vision pour les différentes positions de l'œil

https://fr.wikipedia.org/wiki/Singes_de_la_sagesse

Deux hologrammes « décalés » enregistrés dans le même substrat, visibles sous des angles légèrement différents



La vue centrale permet de visualiser le basculement en « cliquant » dessus

Voilà, je crois avoir répondu à la plupart des questions posées. J'espère que les lecteurs ont trouvé ce qu'ils attendaient et qu'ils se sentent un peu mieux informés sur la « chose holographique ». Si ce n'est pas le cas, je les invite à consulter les ouvrages et/ou articles référencés, ils y trouveront certainement ce qu'ils recherchent. Ils peuvent également m'adresser leurs éventuelles questions via mon adresse courriel « y.renotte@uliege.be », je tenterai de les « éclairer ».

En vous remerciant pour l'attention que vous avez accordée à mes commentaires, je voudrais encore signaler que les figures illustrant le jeu des « Questions – Réponses » ne figuraient évidemment pas dans la version orale initiale transmise à la Maison de la Science. Elles ont été ajoutées ultérieurement dans le souci de pallier l'absence de possibilité d'échange direct avec les « questionneurs » en fournissant une information complémentaire facilitant la compréhension d'un texte dont certains aspects pourraient s'avérer ardues et risquer de rebuter les lecteurs néophytes et/ou peu familiers avec les lois de l'optique (géométrique, ondulatoire ou quantique). Nous espérons qu'elles aident effectivement les lecteurs, notre but étant principalement d'initier en évitant de recourir à la théorie, du moins dans cette partie de l'ouvrage. Les aspects « plus analytiques » seront abordés dans des paragraphes spécifiques.

Conclusion

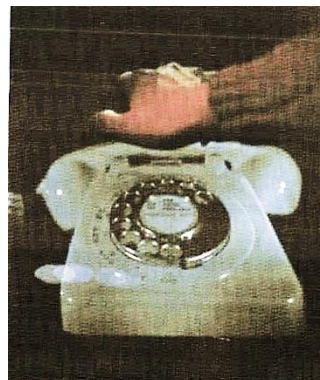
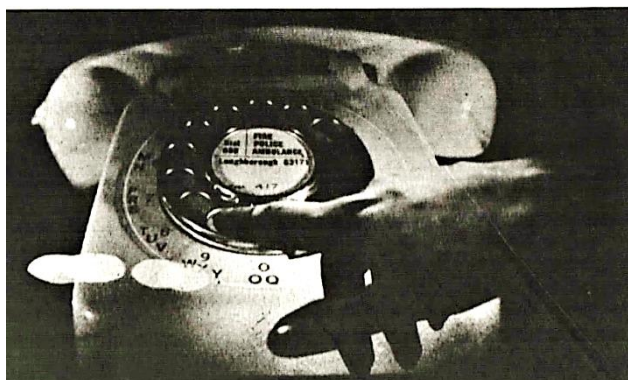
L'imagerie holographique est apparue et s'est développée au début des années '60. Elle a connu un essor exceptionnel . . . pendant une vingtaine d'années au cours desquelles « *tout a été inventé* » par une poignée de scientifiques américains et russes. Le principe datait de 1948.

Cette période glorieuse passée, l'absence de réponse aux attentes du grand public, de nouvelles améliorations et l'émergence de plusieurs procédés concurrents de reproduction du relief, plus aisés à mettre en œuvre, ont entraîné un déclin progressif. Le champ des applications de l'holographie a néanmoins continué à s'étendre et à concerner des domaines de plus en plus divers . . . hors l'imagerie.

J'ose croire que le lecteur est maintenant convaincu que ***l'holographie est une sculpture de lumière*** édiflée par les fronts d'onde modulés par le réseau « *hologramme* ». La méthode fournit une image de la scène enregistrée en « ***relief intégral*** », ce que j'ai appelé le « *relief vrai* » par opposition au « *relief figé* » produit par *stéréoscopie*. Tout se passe comme si l'objet était présent lors de la restitution à tel point que l'on puisse être tenté d'y toucher [Figure 19].

Chaque point du récepteur photosensible reçoit des informations sur l'ensemble de la scène imagée ce qui explique l'expérience de *l'hologramme cassé* dont chaque morceau est capable de restituer une image de la scène. Il faut toutefois remarquer que les informations recueillies dans chaque portion sont spécifiques de l'angle de prise de vue correspondant et chaque élément contribue ainsi à reconstruire l'image sous un angle de vue donné.

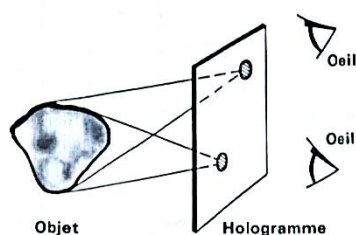
Figure 19 – **Hologramme de transmission par Nick Phillips 1978** (Holographiste anglais)^{18,19}



Nicholas John Phillips
(1933-2009)
De Monfort University
(Leicester) - UK

Hologramme tellement réaliste qu'il produit devant la plaque une image que le spectateur croit à la présence effective du téléphone – la main est réelle sur les photographies ! © HOLOCO & N. Philips Hologram

Figure 20 – **Effet de parallaxe**²⁰



Chaque partie de l'hologramme permet de visualiser la scène sous un angle différent



Deux photographies de la scène holographiée prises au travers de l'hologramme suivant deux directions différentes montrent des parties différentes des personnages

18. Graham Saxby, *Hologrammes, de la prise de vue à leur présentation*, éd. Masson (1980), 101-108

19. Martin J. Richardson, *The Prime Illusion, Modern Holography in the New Age of Digital Media*, The Holographic Image Studio (2006), 14-24

20. Jean-Charles Viénot, Paul Smigielski et Henri Royer, *Holographie optique – Développements, Applications*, Dunod – Paris (1971), 24-27

- Effet de relief** : profondeur de champ
- Mise au point sur l'avant de la voiture (à gauche)
 - Mise au point sur l'arrière de la voiture (à droite)



En se déplaçant, un observateur verra l'image sous des angles différents et les parties visibles de la scène enregistrée varient avec la direction d'observation : c'est l'**effet de parallaxe** [Figure 20]. On peut donc affirmer que l'image restituée à partir d'un hologramme présente toutes les caractéristiques du relief de des objets effectifs comme le montre la séquence des quatre photographies ci-après [Figure 21].

On notera la présence du **speckle** sur les figures 19, 20 et 21 : la **granularité** caractéristique des images holographiques lues en éclairage cohérent.

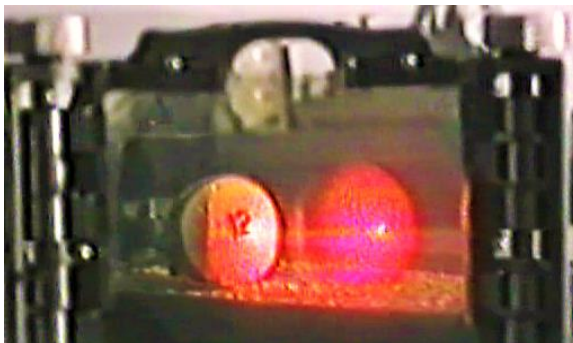
Figure 21 – **Quatre photographies d'une scène** constituée de deux billes de billard et/ou de ses hologrammes dans des configurations différentes (Pierre Slangen, Yvon Renotte et Yves Lion : HOLOLAB - ULiege)²¹



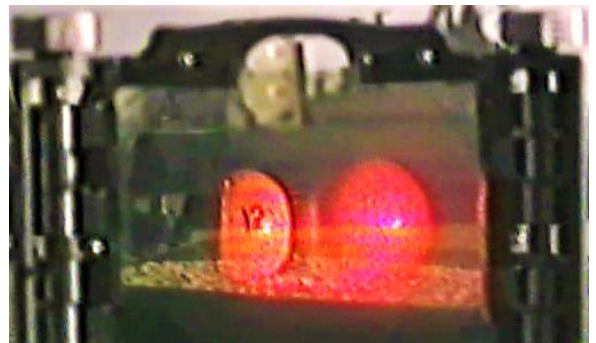
a. Les deux billes sont photographiées au travers de leur hologramme (en transmission et de phase) non éclairé



b. Même scène que a. dont on a enlevé la bille de droite



c. Même scène que b. – l'hologramme est éclairé par le faisceau de référence (LASER HeNe – 632,8 nm)



d. Même scène que c. dont on a enlevé la bille de gauche : l'image holographique correspond exactement à l'objet

21. *La Physique à l'Université de Liège : 1967-1987*, Publication réalisée à l'occasion du XXe anniversaire de l'inauguration de l'Institut de Physique au Sart Tilman, Yves Lion, Président du Conseil de Section de Physique, Club Athena Technologie – Education (1987), 43-44

Des questions . . . que l'on n'a pas posées !

- *Grandeur et décadence de l'imagerie holographique*^{11,22}

Autrefois emblématique du futurisme, l'holographie n'exerce plus la même fascination aujourd'hui bien qu'elle ait envahi notre vie quotidienne et suscite toujours des recherches actives.

Il y a une cinquantaine d'années, les expositions d'hologrammes attiraient des milliers de visiteurs dans le monde entier : le public ébahi découvrait des images tridimensionnelles au réalisme étonnant. La culture populaire célébrait l'holographie au travers de la science-fiction ; les entrepreneurs lui prédisaient des applications dans énormément de domaines, extrêmement variés. *Aujourd'hui, l'holographie s'est muée en une technique fertile, occupant une place importante dans la science moderne et dans notre quotidien mais en se généralisant, elle a perdu une partie de son pouvoir de séduction et peut sembler dépassée.* En outre, d'autres techniques de créations d'images en relief lui sont rattachées à tort ce qui entretient une certaine confusion sur sa nature et ses possibilités exactes. L'histoire de ***l'holographie***, au croisement de disciplines aussi différentes que l'art et l'électronique, ***illustre l'une des plus grandes réussites scientifiques et technologiques de la seconde moitié du 20^e siècle MAIS elle met aussi en évidence les déceptions liées à une vision trop optimiste du progrès.***

Imaginée dans l'immédiat après-guerre (1948) par le physicien anglo-hongrois *Dennis Gabor* dans le souci d'améliorer l'imagerie des microscopes électroniques, l'holographie est fondée sur la manipulation des ondes et des interférences²². L'idée de base est astucieuse mais les articles de Gabor sont presque incompréhensibles pour ses contemporains et n'est quasiment pas exploitée au point que son auteur lui-même s'en détourne pour travailler dans des domaines plus porteurs.

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) : comme lui, Il crée des ondes stationnaires dans une émulsion photographique en faisant interférer la lumière incidente avec celle qui est réfléchiée par l'objet. Le dispositif de Denisyuk évite certains défauts de celui proposé par Gabor mais est confronté à des problèmes pratiques similaires, il a besoin de lumière cohérente . . . 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 cohérente indispensable au développement de l'imagerie holographique. A l'Université du Michigan, en 1961, avec son collègue *Juris Upatnieks*, *Emmett Leith* élabore une méthode pour encoder, puis reconstruire une image sur un transparent photographique par le processus d'hologramme en deux étapes : ***l'imagerie holographique est vraiment née.***

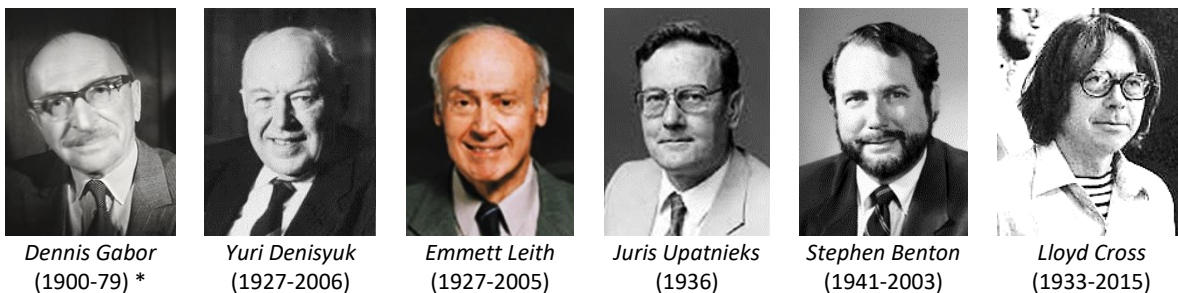
Les développements et les applications progressent rapidement, les innovations s'enchaînent. L'holographie devient plus familière et on commence à comparer son évolution à celle de la photographie. ***En quelques années***, des hologrammes plus rapides, de meilleure qualité, moins chers et plus variés deviennent disponibles, et ***l'expertise redescend des chercheurs vers les ingénieurs et les entrepreneurs.*** De telles images impressionnent le public, qui se prend à espérer la concrétisation des hologrammes imaginés par le cinéma des années 1970, notamment dans *La Guerre des étoiles*, et

22. Sean F. Johnston, *Attributing scientific and technical progress: the case of holography*, History and Technology 21(4) (2005), 367-392 ; <https://doi.org/10.1080/07341510500198701>
Dennis Gabor, *A new microscopic principle*, Nature, 161 (1948), 777-778 ; *Microscopy by reconstructed wave-fronts*, Proc. Roy. Soc. London, A197 (1949), 454-487 ; *Microscopy by reconstructed wave-fronts II*, Proc. Phys. Soc. B64 (6) (1951), 449-469

par la télévision des années 1980, par exemple dans *Star Trek : La nouvelle génération*. Malheureusement, les dispositifs présentés dans ces films qui projettent une image holographique loin du spectateur sans plaques physiques (substrat d'enregistrement), sont irréalistes : les hologrammes nécessitent une plaque d'enregistrement et apparaissent toujours entre cette plaque et le spectateur. Une variante intéressante des hologrammes généralement qualifiée d'*arc-en-ciel*, est développée en 1968 par Stephen Benton alors chez Polaroid Corporation, 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 [voir 1^{re} question].

Dans les années 1980, de nouvelles méthodes de fabrication permettent de produire des hologrammes de réflexion bon marché à partir de modèles : on peut les reproduire en masse par des techniques d'estampillage. On obtient des images peu esthétiques, mais au relief impressionnant. L'holographie trouve plusieurs nouvelles applications telles que la publicité dans les magazines et les dispositifs anticontrefaçon appliqués sur les emballages ou les cartes bancaires : *les hologrammes sont partout*.

Figure 22 – Ils ont inventé l'holographie et l'imagerie holographique



*) Prix Nobel de physique 1971

Dès la fin des années 1960, l'holographie a dépassé le cadre scientifique²³. Quelques artistes ont commencé à s'intéresser à cette nouvelle technologie : les expositions se sont multipliées mais les sujets abordés restant fort limités (en général des natures mortes improvisées à partir d'équipements de laboratoire ou de bibelots) lassent assez rapidement. S'ouvre alors une phase d'exploration esthétique du nouveau medium où scientifiques et artistes coopèrent au sein de cette nouvelle discipline. Après avoir coproduit une des premières expositions d'art holographique à New-York, Cross fonde une *école d'holographie pour le grand public* à San Francisco **en 1971**. D'autres écoles s'implantent rapidement aux Etats-Unis et, dès la fin des années 1970, dans toute l'Europe. En même temps, quelques cinq cents expositions fleurissent, qui créent une demande chez les consommateurs et les hologrammes de pop art alimentent une véritable industrie. **À la fin des années 1980, le succès de cette forme d'art décroît**. Ironiquement, cela va de pair avec l'arrivée des hologrammes produits en

23. Carolina Condes Brena, *L'holographie artistique en France : 1973-1996 : acteurs, manifestations et problématiques*, Mémoire de recherche (2^{de} année de 2^e cycle) en Histoire de l'Art – École du Louvre (2018) ; https://www.academia.edu/39012216/L_holographie_artistique_en_France_1973_1996_Acteurs_manifestations_et_probl%C3%A9matiques

Philippe Boissonnet, *L'ambivalence spatio-temporelle des images holographiques : une esthétique paradigmatique de la lumière*,

https://www.academia.edu/31719286/Lambivalence_spatio_temporelle_des_images_holographiques_une_esth%C3%A9tique_paradigmatique_de_la_lumi%C3%A8re

Évanescences holographiques : entre illusion, doute et réalité,

https://www.academia.edu/35361954/%C3%89vanescences_holographiques_entre_illusion_doute_et_r%C3%A9alit%C3%A9_Conversation_avec_Philippe_Boissonnet

masse et les compromis qui en résultent en termes de qualité. Un tel destin n'est pas rare en science et en technologie.

Aujourd'hui, l'holographie reste présente dans l'imaginaire collectif mais de façon imprécise. **On qualifie souvent à tort d'hologrammes certaines images en trois dimensions, notamment celles de personnes en mouvement.** Un exemple célèbre est la projection sur un podium d'une image du mannequin *Kate Moss* par le grand couturier *Alexander McQueen* : l'image était en réalité créée par une technique de prestidigitation faisant intervenir un jeu de reflets sur un miroir, une technique dite du *fantôme de Pepper* ².

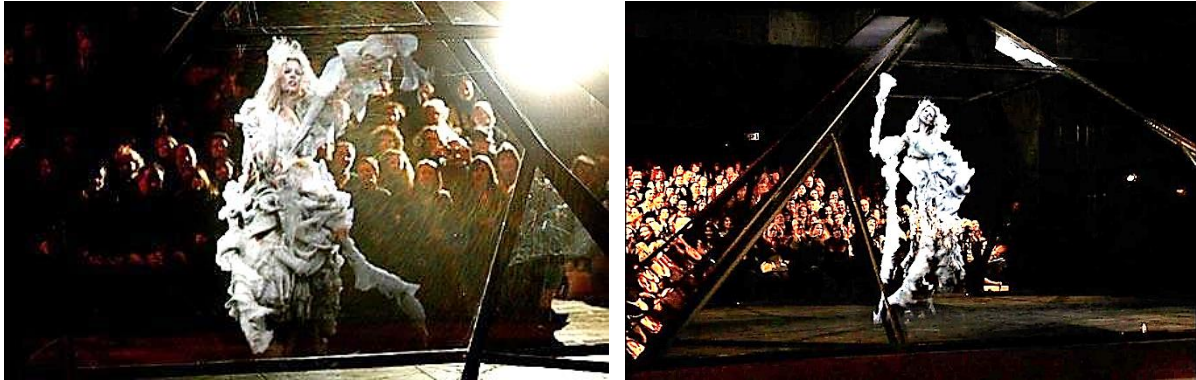


Figure 23 – **Pseudo-Hologramme de Kate Moss** dans une pyramide en verre

Un « hologramme » du modèle *Kate Moss* est projeté sur le podium lors du défilé de mode d'*Alexander McQueen* à la Fashion Week de Paris (Prêt-à-Porter) Automne/Hiver 2006-7, le 3 mars 2006 à Paris, France : « *The Widows of Culloden* » deviendra plus tard partie intégrante de la rétrospective posthume « *Savage Beauty* »
Le créateur et le mannequin était amis à plus d'un titre (Photo de Michel Dufour/WireImage)

<https://www.gettyimages.ch/detail/nachrichtenfoto/hologram-of-model-kate-moss-is-projected-on-the-nachrichtenfoto/56993854?language=fr>

<https://sg.style.yahoo.com/happy-birthday-kate-moss-42-131434967.html>

<https://the-widows-of-culloden.tumblr.com/post/135997339881/the-kate-moss-hologram-at-alexander-mcqueens-aw06/amp>

Comment expliquer le déclin de l'holographie dont les possibilités semblaient inépuisables à la fin des années 1960 ? Outre le fait que l'imagerie holographique n'a pas rencontré les espérances et attentes du public (absence de mouvement, reproduction imprécise des couleurs, taille relativement restreinte, . . .), des erreurs de gestion tant sur le plan scientifique et technique que commerciale ont conduit à des études redondantes, à une surabondance de publications et à une confusion sur le plan de la propriété intellectuelle. **Malgré tout, la recherche et le développement en holographie se poursuivent plus discrètement aujourd'hui.** Un objectif à plus ou moins long terme est le *stockage de données* via des hologrammes inscrits dans des matériaux tels que des photopolymères et des cristaux. Les *hologrammes de sécurité* évoluent rapidement pour conserver une longueur d'avance sur les contrefaçons. De nombreux dispositifs, tels des écrans radar d'avions ou des lecteurs de code-barre incluent des *composants holographiques* qui peuvent combiner dans un seul élément les propriétés d'un miroir, d'une lentille et d'un prisme.

Bien que moins sous les feux de la rampe, l'holographie est donc encore bien vivante !

L'une des causes probables du désintérêt progressif pour l'imagerie holographique résulte sans doute de la difficulté de l'associer à la cinématographie et à la télévision. Les essais ne furent pas couronnés de succès mais les résultats de travaux effectués à l'*Université d'Arizona* permettent d'espérer . . . même si l'évolution est très lente. **Des hologrammes se sont animés, modestement, mais il s'agit incontestablement d'un nouveau pas vers la vidéo holographique** ²⁴.

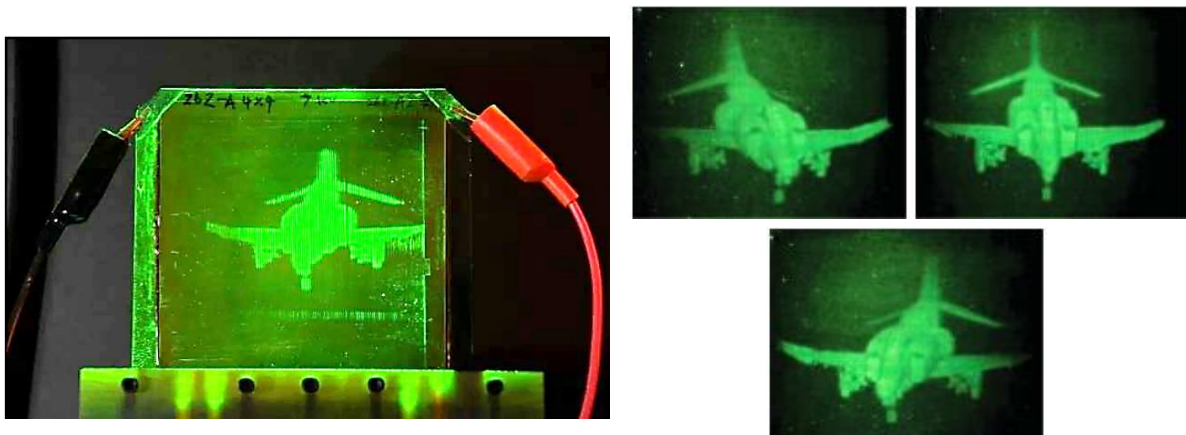
24. <https://news.arizona.edu/story/moving-holograms-from-science-fiction-to-reality>

<https://www.20minutes.fr/sciences/618105-20101104-sciences-des-hologrammes-3d-animent-nouveau-vers-video-holographique>

Après des années de tâtonnements, et surtout d'absence de résultats probants, en 2010, des physiciens américains ont réussi à produire des images holographiques animées grâce à un nouveau matériau réinscriptible. *On est enfin passé de la science-fiction à la réalité !* L'équipe du Pr Nasser Peyghambarian (University of Arizona) a développé un nouveau type de **télé-présence holographique** qui permet la projection d'une image animée en trois dimensions sans avoir besoin de lunettes spéciales ni d'autres dispositifs auxiliaires pour regarder les images holographiques 3D de voitures, de maquette d'avions ou d'orateurs qui s'animent dans les petits films diffusés par les auteurs de l'étude. La nouvelle technique d'imagerie permet d'animer des hologrammes en 3D en rafraîchissant l'image toutes les deux secondes, avec des applications possibles pour la télémédecine, l'industrie, la publicité ou le divertissement. Il est ainsi possible de transmettre à distance, presque en temps réel, ces images en trois dimensions ce qui représente un nouveau pas vers la vidéo holographique selon *la revue scientifique Nature* qui consacre la couverture de son numéro de novembre 2010 à cette avancée.

Le dispositif repose sur l'utilisation d'une **technique stéréo-holographique et un écran constitué d'un matériau polymère photoréfractif** permettant d'inscrire ou d'effacer rapidement un hologramme. Sa mise au point avait été annoncée début 2008 mais l'image ne pouvait alors être actualisée que toutes les quatre minutes. Deux ans plus tard, le système permet de rafraîchir les hologrammes toutes les deux secondes, ce qui autorise à parler de « **quasi-temps réel** ». A titre de comparaison, en télévision ou au cinéma les images sont rafraîchies 50 fois plus souvent ce que nos yeux perçoivent comme du mouvement continu. Pierre-Alexandre Blanche et al. décrivent en détail le dispositifs de télé-présence et proposent plusieurs exemples d'application en soulignant la spécificité de **l'holographie**, mainte fois répétée, vis-à-vis d'autres techniques d'imagerie 3D : elle **permet à l'observateur de percevoir la lumière comme si elle était diffusée par l'objet réel lui-même** ²⁵.

Figure 24 – Dispositif de télé-présence holographique (à gauche)



À droite : photographies de l'image holographique enregistrée sous trois angles – la perspective, preuve du caractère holographique est aisément perceptible ²⁵

On notera que la technique n'est pas aisée à mettre en œuvre. L'image est captée par seize caméras prenant des vues sous plusieurs angles. Elle est ensuite encodée sous forme d'hologramme grâce à deux lasers dont les faisceaux interfèrent. Comme en stéréo-holographie, on exploite la propriété que pixel contient une information 3D sous toutes ses différentes perspectives [voir 1^{re} question]. Le prototype d'écran ne faisait que 25 centimètres de côté avec des images monochromes mais des versions « couleurs » plus grande (43 cm) ont été développées depuis. À l'époque, P.A. Blanche déclarait : « *En deux ans, nous avons amélioré la vitesse d'un facteur 100. Si nous pouvons améliorer*

25. 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 ; <https://doi.org/10.1038/nature09521>

la vitesse du même facteur, nous dépasserons le débit vidéo. **Ça sera fait !** » : aujourd'hui, le groupe concentre ses efforts sur la vitesse d'enregistrement.

Les *stéréogrammes holographiques* comptent parmi les images tridimensionnelles les plus impressionnantes en termes de rendu de parallaxe et de profondeur : ils ont la capacité d'afficher des couleurs saturées et de reproduire le réalisme. Aucune lunette spéciale n'est requise pour les voir et il existe des exemples étonnants de cette technique utilisée avantageusement pour des applications médicales, architecturales et militaires. **Le système en développement est capable d'enregistrer rapidement et en continu des stéréogrammes holographiques actualisables ce qui constitue une avancée significative vers le développement de la télévision 3D autostéréoscopique avec reproduction de la parallaxe de mouvement et réalisme du rendu** ²⁶.

Enregistrer des stéréogrammes holographiques actualisables en continu a nécessité la mise au point d'un dispositif opto-mécanique élaboré basé sur la rotation d'une courroie dans une seule direction qui permet une vitesse d'enregistrement beaucoup plus rapide que précédemment. Les données sont téléchargées séquentiellement sur un *modulateur spatial de lumière* ²⁷ pour former le faisceau objet. Actuellement, les performances sont limitées par le taux de répétition des LASERS. La prochaine étape consistera à surmonter ce handicap afin de pouvoir enregistrer le stéréogramme holographique avec une efficacité de diffraction suffisante pour former une image nette.

Figure 25 – L'équipe



Pierre-Alexandre Blanche



Nasser Peyghambarian

University of Arizona – USA

À droite : La couverture du numéro 468 – Novembre 2010 de la revue *Nature* ²⁵



L'holographie est toujours considérée par les spécialistes comme la technologie ultime qui permettra le rendu de tous les repères optiques nécessaires au système visuel humain pour voir les images projetées en 3D. Toutes les autres technologies souffrent de compromis qui limitent le rendu 3D. Néanmoins, ces technologies s'avéreront probablement être des tremplins menant à un meilleur confort visuel jusqu'à ce que les affichages holographiques soient réalisés.

Certaines des portes qui empêchaient la télévision holographique d'être possible il y a seulement quelques années ont été déverrouillées. Le calcul rapide d'hologrammes 3D pour bien contrôler le réalisme des rendus et la parallaxe est à portée de main tout comme une solution au problème de transmission de données.

Cependant, **des défis restent à résoudre.** Deux des principaux obstacles sont le calcul d'hologrammes 3D réalistes dans un délai raisonnable et un dispositif électronique approprié pour la reproduction de grandes images holographiques 3D à haute résolution. Néanmoins, la difficulté de projeter de grands

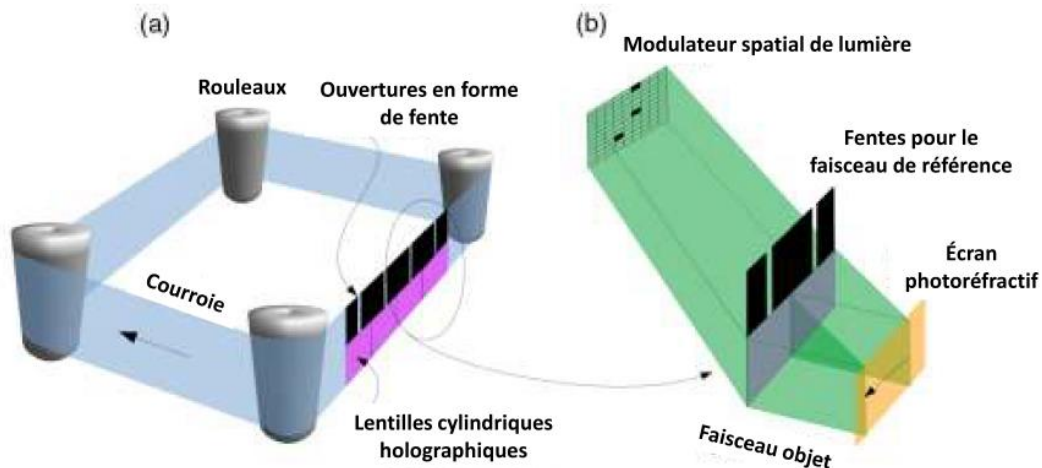
26. P.A. Blanche et al., *Fast and continuous recording of refreshable holographic stereograms*, Optical Engineering, 57 (6), 061608 (2018), 6 pages

27. https://en.wikipedia.org/wiki/Spatial_light_modulator

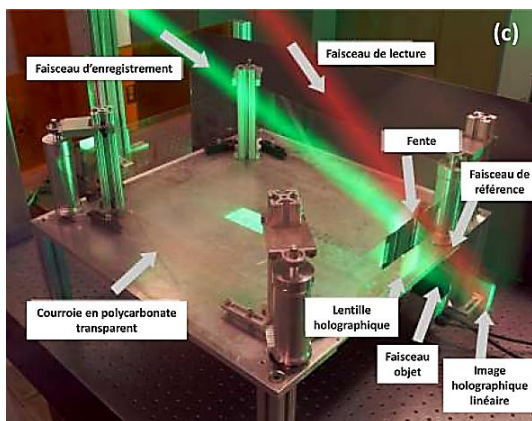
hologrammes ne sera bientôt plus du domaine de l'ingénierie mais se transformera plutôt en un problème économique. Au départ, le matériel nécessaire à la construction d'un téléviseur holographique sera trop coûteux pour être commercialisé avec succès en tant que téléviseur. Mais une fois que le prix deviendra abordable, **la télévision holographique sera confrontée à l'obstacle auquel se heurte chaque nouveau média, la disponibilité d'un contenu correctement formaté**. Il n'y a aucun avantage à posséder un téléviseur holographique si les créateurs produisent encore exclusivement des films en 2D !²⁸

C'est le désir qui fera de la télévision holographique une réalité . . . à suivre !

Figure 26 - Schémas de la configuration opto-mécanique utilisée pour enregistrer un stéréogramme holographique en continu²⁶



- a) La courroie rotative entraînée par quatre rouleaux, porte des lentilles holographiques flexibles pour former le faisceau objet ainsi que des fentes pour former le faisceau de référence
- b) Le faisceau objet est formé par réflexion sur un modulateur spatial de lumière et focalisé en une ligne par les lentilles cylindriques holographiques
La ligne balaye l'écran photoréfractif lorsque la lentille translate



- c) Configuration d'enregistrement basée sur le schéma ci-dessus
Une longue exposition a été utilisée pour permettre la visualisation des faisceaux LASER
Le vert correspond aux faisceaux d'enregistrement et le rouge au trajet du faisceau de lecture - L'écran photoréfractif est absent
[spécial merci au Pr P.A. Blanche pour les informations et les références communiquées]

- L'holographie a-t-elle (encore) un avenir ?

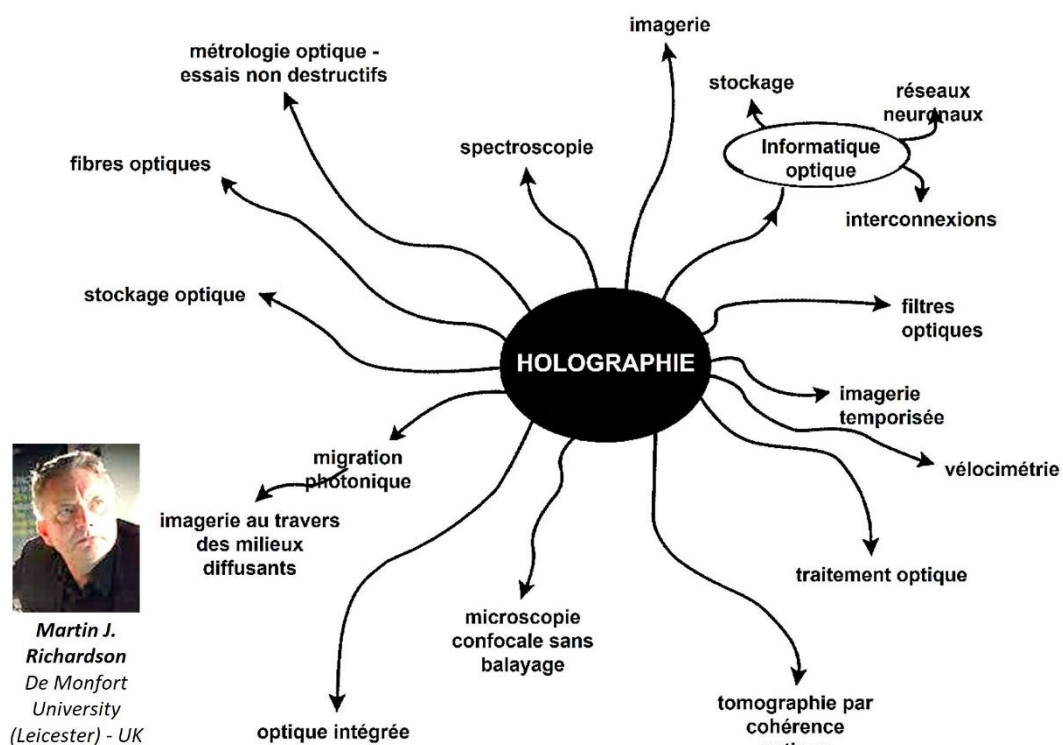
Compte tenu des réflexions précédentes, je serais tenté par une réponse « à la Normand » : **Oui et Non. Non** parce que plusieurs champs, tel l'imagerie à destination du grand public, se sont progressivement fermés. **Oui** parce que d'autres, tels l'interférométrie et la métrologie optique ou encore la lutte anticontrefaçon et la protection du patrimoine sont apparus et/ou se sont développés considérablement. Et pourquoi pas certains, insoupçonnés, voire inconnus actuellement, se révéleront

28. P.A. Blanche, *Holography, and the future of 3D display*, Light : Advanced Manufacturing, 2 (4) (2021), 446-459

dans un avenir plus ou moins proche. *Ce qui est « impossible » aujourd’hui sera peut-être « trivial » demain ? « Time will show . . . ».*

Il y a une cinquantaine d’années, à « l’époque héroïque des débuts de l’holographie », Paul Smigielski, pionnier français, prédisait que *chaque jour verrait apparaître de nouvelles applications spectaculaires, que les promoteurs de cinéma et de télévision en relief intégral étaient intéressés, que la science-fiction s’emparerait de l’holographie, que l’hologramme prendrait sa juste place dans le domaine du traitement de l’information comme composant essentiel des ordinateurs de l’avenir, etc*²⁹. Si certaines prédictions se sont réalisées, beaucoup n’ont malheureusement jamais vu le jour. L’intérêt du grand public pour l’imagerie ayant progressivement décliné, le centre de gravité de la « *res holographica* » s’est déplacé vers des domaines tout aussi efficaces mais moins médiatisés : l’industrie, le médical, le spatial, la protection, voire l’armement. L’avènement de matériaux photosensibles réinscriptibles semblait ouvrir largement les portes au stockage holographique des informations. Certains voyaient déjà l’hologramme remplacer avantageusement les CD, DVD, cartes SD et autres disques durs. Mais comme en cinématographie et en télévision, des dispositifs concurrents, moins chers et plus faciles à produire en masse, sont apparus, ont été développés et ont rapidement damé le pion aux mémoires holographiques, . . . du moins pour l’instant.

Figure 27 – « Octopus » holographique



Martin J. Richardson
De Monfort University
(Leicester) - UK

Emmett Leith – Applications de l’holographie^{29,30}

Trente ans plus tard, *Martin J. Richardson*, spécialiste international de l’Holographie tente une synthèse des futurs champs possibles d’activités pour l’holographie au 21^e siècle³⁰. Pour ce faire, il a rassemblé les idées et informations recueillies auprès des plus éminents promoteurs internationaux

29. Jean-Charles Viénot, Paul Smigielski et Henri Royer, *Holographie optique – Développements, Applications*, Dunod – Paris (1971), 198

30. Martin J. Richardson, *The Prime Illusion, Modern Holography in the New Age of Digital Media*, The Holographic Image Studio (2006), 65-75

actifs en holographie et établi des cartes destinées à baliser de futurs plans de développement : *le terreau du futur de l'holographie*, un programme ambitieux destiné à fédérer les disciplines concernées par la technique et/ou susceptibles de l'être, tant les développeurs que les utilisateurs ! Les résultats de cette collecte sont principalement consignés dans deux publications, l'une détaille les applications y compris potentielles³¹, l'autre le contexte historique de l'holographie³². Aujourd'hui, Richardson voit plutôt l'avenir de l'holographie, du moins de l'imagerie, dans une « collaboration » avec les techniques de projection d'avatars électroniques tout en admettant qu'il ne s'agit pas réellement d'hologrammes « *stricto sensu* ». *Sacrifiant au pragmatisme, son choix est peut-être dicté par un souci d'efficacité : on n'arrête pas le progrès !*

La plupart des technologies « *dites holographiques* » actuelles sont une version moderne du « *fantôme de Pepper* », une technique d'illusion optique couramment utilisée dans le théâtre au 19^e siècle, mais plus ancienne². Elle consiste à projeter l'image d'une personne sur une surface réfléchissante cachée, créant ainsi l'illusion d'un fantôme. De plus en plus de personnalités des mondes politique, du spectacle, voire de l'enseignement y recourent. De nouveaux progrès ont fait entrer cette technologie de plein pied dans le 21^e siècle, permettant aux utilisateurs d'interagir, d'apprendre et même de commercialiser des produits, avec des « *hologrammes réalistes* » en 3D. La *réalité augmentée* donne la possibilité d'interagir avec une couche d'information numérique superposée au monde physique. Il ajoute néanmoins « *Bien que les véritables hologrammes en 3D soient créés par l'interférence de faisceaux lumineux émis par une source cohérente, les lois de la physique nous empêchent de concentrer la lumière dans un air de faible densité. Par conséquent, les solutions holographiques modernes ont tendance à combiner la réalité augmentée avec le fantôme de Pepper, pour produire ce qui ressemble à des hologrammes en 3D* ». Des entreprises du monde entier développent des « *projections holographiques* » susceptibles de bouleverser la manière dont les hommes travaillent, apprennent et interagissent : aujourd'hui, grâce aux « *hologrammes* », des étudiants peuvent visualiser un organe en trois dimensions, de tous les côtés, ainsi que l'ensemble des formes et des voies qui le traversent et l'enseignant peut présenter différents cas, par exemple, une tumeur dans le cerveau, un poumon rempli de liquide ou une artère coronaire bouchée. Le *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) de la NASA, développe plusieurs applications permettant aux ingénieurs de concevoir du matériel spatial au moyen « *d'hologrammes en grandeur réelle* » au lieu d'un logiciel de CAO, aux astronautes de la station spatiale internationale d'accéder à un « *manual d'instruction holographique* » et travailler en tandem avec les équipes au sol pour réaliser des tâches complexes, aux scientifiques de parcourir virtuellement la surface de Mars en utilisant des images et des données récoltées par le robot *Curiosity*.

Si la majorité des systèmes holographiques nécessitent un casque spécial et individuel pour visualiser des projections en 3D, des entreprises ont mis au point des dispositifs de visualisation pour un plus grand nombre de spectateurs simultanés. Des tables « *d'affichage holographique* » créent des projections 3D visibles par plusieurs personnes simultanément, ce qui en font un outil parfait de collaboration en temps réel. Ainsi, une équipe de médecins hospitaliers pourrait analyser « *l'hologramme* » du cœur d'un patient et établir un plan d'opération détaillé ou visualiser le débit sanguin, . . . et des exemples d'applications dans des domaines les plus divers apparaissent tous les jours.

31. Emmett Leith, *Holography in the United States, 1997*, Proceedings of SPIE – 6th International Symposium on Display Holography, Lake Forest College, Vol. 3358 (1998)

32. Stephen A. Benton, *Selected Papers on Three-Dimensional Displays*, SPIE Milestone Series, Bellingham, WA, Vol. MS 162 (2001), *Introduction*

Figure 28 – Exemples d'applications de réalité augmentée associée à « l'holographie »



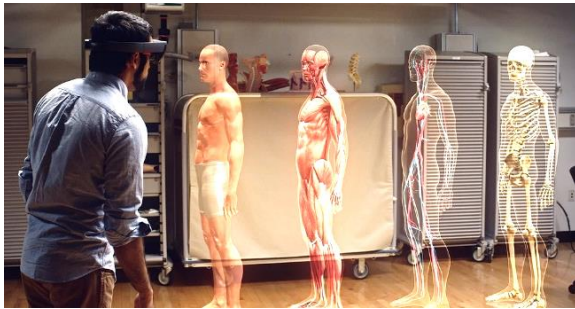
Applications industrielles

Utilisation du casque de réalité augmentée développé par Microsoft – HoloLens ©

<https://www.microsoft.com/fr-fr/hololens>

Les hologrammes sont-ils le futur du télétravail ?

<https://www.lecho.be/innover/tech/les-hologrammes-sont-ils-le-futur-du-teletravail/10342171.html>



https://fr.freepik.com/photos-gratuite/medecins-utilisant-tablette-transparente-technologie-medicale-holographique_13313355.htm
Freepik.com

Applications médicales

Comment la technologie holographique aide les médecins à dispenser des soins de meilleure qualité

<https://compassmag.3ds.com/fr/toward-a-holographic-future/>

Holo Care ©
SopraSteria.com



[HoloCare parmi les vainqueurs du hackathon #EUvsVirus pour sa numérisation de la relation médecin-patient \(soprasteria.com\)](#)

Bien que les chercheurs soient encore loin de comprendre et d'exploiter tout le potentiel de l'holographie, Richardson lui prédit un bel avenir commercial au cours des dix ou vingt prochaines années. Il conclut sa réflexion en déclarant « La photonique entraînera un changement massif d'infrastructure dans laquelle les LASERS et les photons serviront à envoyer des informations et faciliteront l'accès aux données enrichies, nécessaires à la véritable holographie. La transformation s'amorcera, en premier lieu, dans les secteurs de la santé, de l'architecture et de l'ingénierie, ensuite elle deviendra suffisamment bon marché pour les

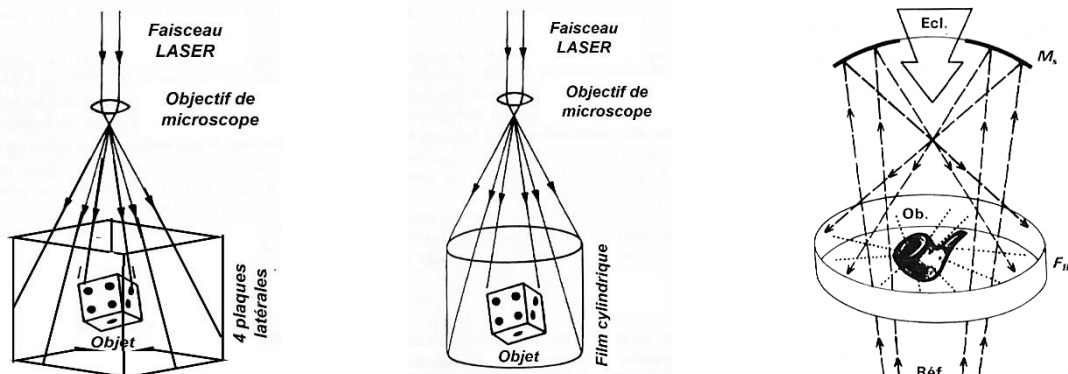
consommateurs. Nous aurons peut-être à terme des smartphones capables de filmer en holographie des événements en temps réel. »³³

- Images holographiques à 360°^{34,35,36}

Un inconvénient des hologrammes conventionnels est la limitation de l'angle sous lequel ils peuvent être visualisés. Des hologrammes qui donnent une vue complète d'un objet, à 360°, peuvent être enregistrés de différentes manières : dans un cube à l'aide de quatre plaques photosensibles posées sur les faces latérales, ou dans un cylindre de film entourant l'objet. Dans ce cas, l'objet est placé au centre d'un cylindre de verre avec une bande de film photographique collée sur sa surface intérieure, le côté émulsion tourné vers l'intérieur. La partie centrale d'un faisceau LASER étendu éclaire l'objet par le haut tandis que la partie extérieure tombe directement sur le film et constitue le faisceau de référence. Pour visualiser l'image reconstruite, le film traité doit être replacé dans sa position d'origine et éclairé par le même faisceau LASER.

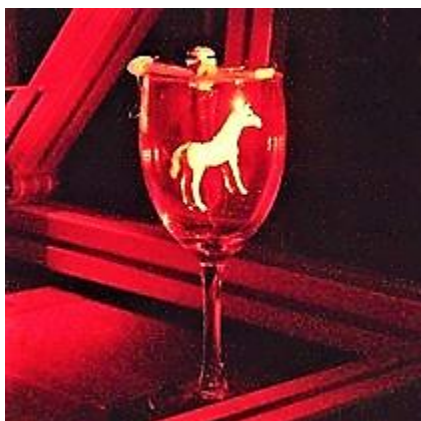
Un arrangement de miroirs plus élaboré et l'utilisation de plusieurs films dont on tapisserait l'intérieur d'une sphère dans une situation idéale, pourrait produire une image restituée observable suivant n'importe quelle direction, en véritable lévitation dans l'espace.

Figure 29 – Holographie à 360°



Les différents montages présentés font appel à la technique du « rayon partagé » : les faisceaux objet et de référence sont produits sans diviseur de rayon

M_s : miroir sphérique, Ob : objet
F_H : film holographique



Exemple d'hologramme à 360°

Jeff Blyth

University of Cambridge – UK

Hologramme d'un cheval dans un verre à vin

Obtenu par dépôt d'une couche de halogénure d'argent [AgHal] sur l'intérieur du verre

http://holowiki.nss.rpi.edu/w/index.php?title=Holograms_on_Wine_Glasses_and_Glass_Plates&mobileaction=toggle_view_desktop

33. Martin J. Richardson, *Un futur holographique, les hologrammes font leur apparition dans le monde des entreprises*, Compass, The 3DExperience Magazine (November 20th, 2016), Rebecca Gibson's Interview ; <https://compassmag.3ds.com/fr/toward-a-holographic-future/>

34. Parameswaran Hariharan, *Basics of Holography*, Cambridge University Press (2002), 60-71

35. Jean-Charles Viénot, Paul Smigielski et Henri Royer, *Holographie optique – Développements, Applications*, Dunod (Paris), 113-115

36. Christopher Outwater et Eric Van Hamersveld, *Holographie : guide théorique et pratique de la photographie en trois dimensions*, éditions l'Étincelle, Montréal (1977), 81-86

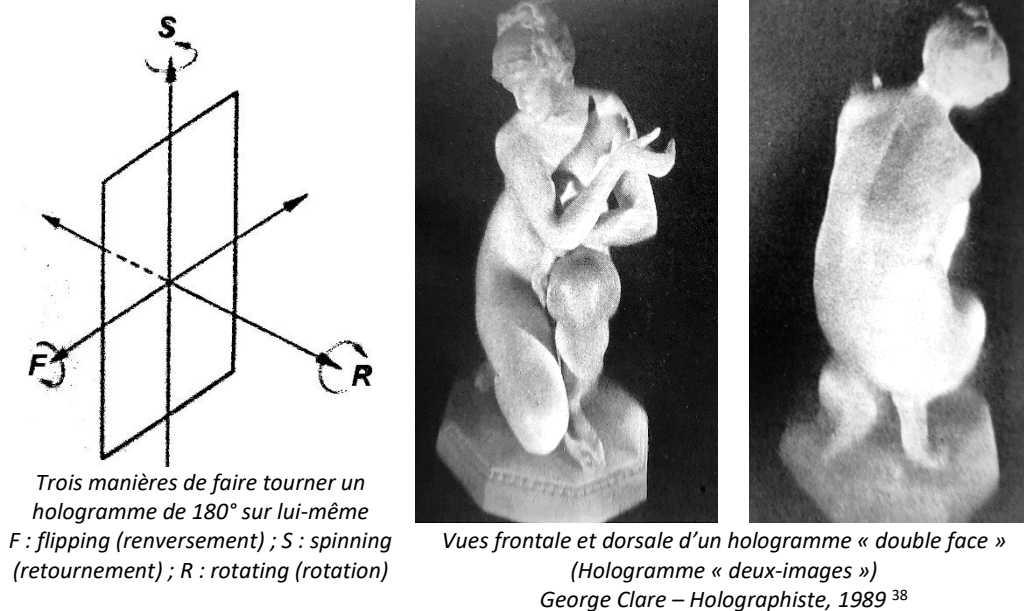
La configuration « 360° » rappelle celle des *Multiplex* mais l'analogie est principalement géométrique et visuelle, les deux dispositifs donnant des effets visuels différents : contrairement aux stéréohologrammes, l'observation selon 360° ne produit aucune impression de mouvement. L'image de l'objet, même si elle paraît également « flotter » dans le cylindre éclairé, reste immobile et ne présente pas d'irisation puisqu'il s'agit d'un hologramme de transmission, en principe éclairé par un faisceau LASER monochromatique.

D'autres procédures fournissent des résultats aussi surprenants : les hologrammes *multi-images* et *multi-canaux*³⁷. Les deux donnent des images tridimensionnelles interpénétrées qui changent avec le point de vue ce qui est impossible en imagerie photographique si ce n'est au prix d'enregistrements multiples et de superpositions via des négatifs séparés.

L'expérience montre que l'on peut superposer jusqu'à quatre images dans un seul hologramme mais comme les franges qui les produisent occupent le même matériau photosensible, les images s'affaiblissent à mesure que leur nombre augmente. Il faut donc déterminer le plus précisément possible les temps d'exposition et de développement optimaux ce qui nécessite un travail préparatoire conséquent. *Il est cependant possible d'obtenir des images plus lumineuses en orientant l'objet et les faisceaux de référence de sorte que les franges se forment dans des directions différentes.*

Une autre méthode permet de produire un hologramme qui montre différentes images lorsqu'elles sont vues de face ou de dos. Après une première exposition faite de manière habituelle, on tourne le film de 180° autour d'un axe vertical et on expose un deuxième sujet. On peut effectuer les opérations précédentes avec les moitiés avant et arrière d'un objet : on obtient ainsi un *hologramme plat à 360°*. Un certain nombre d'hologrammes commerciaux d'objets d'art ont été réalisés de cette manière et les remplacent dans certains musées.

Figure 30 – Hologramme multi-images³⁷



En visitant une exposition d'imagerie holographique, vous avez peut-être été intrigué par des hologrammes dans lesquels l'image change soudainement lorsque vous vous déplacez de gauche à droite ou de haut en bas. Ces hologrammes sont connus sous le nom d'*hologrammes multicanaux*, et comme les images sont codées dans l'hologramme avec une parallaxe restreinte, il est possible

37. Graham Saxby, *Manual of Practical Holography*, Focal Press – Oxford (1991), 63-74

38. Jeff Blyth, *Red Sensitive DCG*, Holographics International (Winter 1989), 22-24

Sunny Bains, *Lab. Notes*, and Jeff Blyth, UK Patent Application, GB, 2 232 263 A : *Photosensitive material for producing holographic recordings* (1989), 11 + 19 pages

d'inclure un grand nombre d'images dans un hologramme sans sacrifier la qualité de l'image. J'ai proposé l'exemple d'un hologramme à trois canaux en décrivant le cas des trois singes de la sagesse déjà évoqué [Figure 18].

- *Et la vraie couleur ?* Ou comment concilier le principe de la trichromie traditionnellement utilisé en reproduction des couleurs et la décomposition spectrale des lumières polychromatiques par diffraction et interférométrie ?

Il me paraît utile de d'abord rappeler ce qu'est la couleur, ou plutôt ce qu'elle n'est pas ?

La couleur n'est pas une grandeur physique, elle ne peut pas être quantifiée par un nombre suivi d'une unité : **c'est une sensation créée par notre cerveau.**

Vous allez me rétorquer « **Et les longueurs d'onde** (du spectre visible), elles sont quantifiées par un nombre, compris entre 400 et 700, et une unité, le nanomètre » ?

Vous avez raison MAIS ces grandeurs ne concernent que les **teintes** (je préfère utiliser ce terme pour désigner une impression visuelle colorée au sens large) **saturées** résultant de la décomposition spectrale de la lumière blanche par réfraction ou par diffraction. Depuis I. Newton, nous savons que la lumière blanche n'est pas une teinte « pure », elle est composée d'une succession de teintes continument distribuées du violet profond (380 nm) au rouge profond (730 nm). *Il est plus correct de quantifier les teintes* des ondes lumineuses (électromagnétiques) **par leur fréquence** que par la longueur d'onde qui varie lorsque la lumière passe d'un milieu dans un autre (la longueur d'onde d'une radiation monochromatique est plus petite dans l'eau ou dans le verre que dans l'air), pas la fréquence : la longueur d'onde dans le vide (ou dans l'air) $\lambda_0 = c/\nu = n\lambda$, c étant la vitesse de la lumière dans le vide (= 299 792 458 m/s), ν et λ : respectivement la fréquence de la radiation monochromatique et sa longueur d'onde dans le milieu transparent d'indice de réfraction n . Par exemple pour *le verre* et la radiation rouge du LASER HeNe : $n = 1,5$; $\lambda_0 = 632,8 \text{ nm}$; $\lambda = 421,9 \text{ nm}$ et $\nu = 473,76 \text{ THz}$ (1 térahertz = 1 THz = 10^{12} Hz = mille milliards de hertz).

Hors les teintes spectrales, il existe une infinité de teintes qui ne peuvent pas être quantifiées simplement par une fréquence (ou une longueur d'onde – *je continuerai à utiliser cette grandeur par facilité*) : quelle est la longueur d'onde d'une plage colorée en « *rose bonbon* » ou en « *lilas* » (nuance de mauve) ?

Des études menées du 18^e au 20^e siècles par des personnalités aussi célèbres que *Isaac Newton* (1647-1727/**1704**), *Thomas Young* (1773-1829/**1801**), *James Clerk Maxwell* (1831-79/**1855**), *Hermann G. Grassmann* (1809-77/**1853**), *Hermann Helmholtz* (1821-94/**1859**) et *Erwin Schrödinger* (1887-1961/**1920-27**), ont montré qu'il est possible de préciser très exactement une teinte à l'aide de trois paramètres : c'est le **principe de la trichromie**³⁹. D'une manière générale, on peut reproduire une

39. Paul Kowaliski, *Vision et mesure de la couleur*, Masson éd., Physique fondamentale et appliquée – 2^e édition actualisée par Françoise Viénot et Robert Sève (1990)

Isaac Newton, *Optiks : a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Ligth, Also Two Treatises of the Species and Magnitudes of Curvilinear Figures, Livre 1^{er}, 2^e partie, propositions VI/II*, London, printed by S. Smith & B. Walford, printers of the Royal Society (1704), Dover Publications (1952)

A letter of Mr. Isaac Newton, Professor of the Mathematicks in the University of Cambridge ; *containing his new theory about light and colors* : sent by the author to the publisher from Cambridge, Febr. 6. 1671/72 ; in order to be communicated to the R. Society, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Volume 6, n° 80 (1671), 3075-3087 and April 13. 1672 ; Volume 7, n° 83 (1672), 4059-4062

James Clerck Mawxell, *On the theory of coumpound colours and the relations of the colours of the spectrum*, Proc. Royal Soc., 10 (1859-60), 404-409 et 484-486 ; *On the theory of three primary colours*, Scientific Papers, Vol.1(1890), 445-450

teinte en superposant trois faisceaux lumineux *convenablement choisis* (le mélange de deux ne peut pas donner la troisième et la somme des trois doit donner le blanc « équi-énergétique »). L'expérience a montré qu'**un faisceau bleu, un vert et un rouge** correctement choisis et dosés en intensité constituent un système de « **couleurs fondamentales** » répondant aux critères recherchés. La **CIE** (Commission Internationale de l'Éclairage – **1931**) a précisé les caractéristiques des *sources étalons réelles*, les **primaires spectrales**, bases du **système R-G-B** : longueurs d'onde $\lambda_R = 700 \text{ nm}$, $\lambda_G = 546,1 \text{ nm}$ (raie verte du mercure) et $\lambda_B = 435,8 \text{ nm}$ (raie bleue du mercure) dans le rapport de luminances photométriques 1,0 : 4,59 : 0,06.

En pratique on n'utilise les primaires réelles qui exigent une subtilité analytique (des paramètres négatifs) pour pouvoir rendre compte de toutes les teintes. On recourt à un artifice, les **primaires virtuelles X, Y et Z** (les *coordonnées trichromatiques*) qui sont des *combinaisons toujours positives de R, G et B* (les *composantes trichromatiques*) et *Y l'éclairement de la scène* ($Y = R + 4,59 G + 0,06 B$). En divisant les coordonnées par leur somme, on les normalise et l'on obtient les **coefficients trichromatiques x, y et z** tels que $x + y + z = 1$. Les **diagrammes de chrominance** proposent une variante de la trichromie : **deux paramètres de chrominance x et y** qui situent précisément la teinte dans le diagramme, et **un troisième, photométrique, Y** qui indique **l'éclairement de la plage considérée** (on l'appelle communément *l'intensité lumineuse*, il se mesure en *watts par mètre carré ou en lux*). Si $Y = 0$, on se trouve au *point alychne* de la représentation vectorielle de l'espace colorimétrique où l'éclairement est nul : **c'est le point « sans lumière »**.

Le mode de fonctionnement exposé ci-avant repose sur le processus de **synthèse additive des couleurs** largement utilisé en cinématographie, télévision, informatique et photographie (diapositives). Une autre technique, la **synthèse soustractive des couleurs**, consiste à soustraire trois **couleurs secondaires** à l'aide de filtres d'un éclairement uniforme blanc. Ce sont le cyan, le magenta et le jaune, respectivement teintes complémentaires des primaires rouge, vert et bleu (la teinte complémentaire d'une teinte primaire ou secondaire est celle des trois teintes secondaires ou primaires n'intervenant pas dans le mélange donnant la teinte primaire ou secondaire – *exemple : le jaune, teinte secondaire, est la teinte complémentaire du bleu, teinte primaire, et résulte du mélange des teintes primaires rouge et vert*). Une teinte ajoutée à sa complémentaire donne du blanc en additif, du noir en soustractif. La synthèse soustractive intervient en peinture, photographie (négatifs couleurs), imprimerie couleur et autres techniques de reproduction d'images colorées.

La représentation graphique du domaine des couleurs a notamment pour but l'appréciation des importances relatives des différentes teintes. Or, en conséquence de la nature intrinsèquement non euclidienne de l'espace des couleurs, l'espacement des échelles de couleurs varie d'un point à l'autre. Il en résulte que les espaces impartis aux représentations des diverses teintes ne sont pas équivalents : on constate aisément que la zone impartie aux verts est nettement plus vaste que celles des rouges et des bleus ce qui crée inévitablement un déséquilibre dans l'acuité de la précision des définitions de deux teintes voisines. Pour tenter de palier ce défaut et établir un espacement plus uniforme des échelles de couleurs, la CIE a procédé à deux corrections en remplaçant les coefficients x, y et z par le trio **u, v et Y** en 1960 et **u', v', Y** en 1976. Les paramètres u, v et u', v' sont des combinaisons des coefficients x et y , ils fournissent les « **diagrammes uniformes de chromaticité** » qui devraient remplacer le *diagramme de chrominance*. On notera que dans la pratique, ce dernier est encore souvent préféré à celui recommandé en 1976.

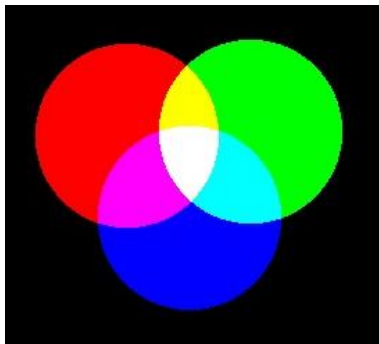
Je ne considérerai pas ici *l'aspect artistique ni le traitement numérique des couleurs*⁴⁰. Pour ce dernier, l'informatique a développé de nombreux outils, programmes et applications spécifiques, très performants détaillés dans des articles et ouvrages spécialisés⁴¹.

40. Georges Roque, *Art et science de la couleur*, éditions Gallimard (revue et augmentée) – collection Tel (2009)

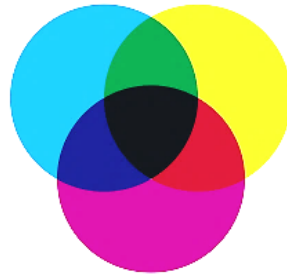
41. https://fr.wikipedia.org/wiki/Codage_informatique_des_couleurs ;
https://fr.wikipedia.org/wiki/Image_num%C3%A9rique

Le lecteur intéressé trouvera des informations détaillées dans la présentation référencée ⁴².

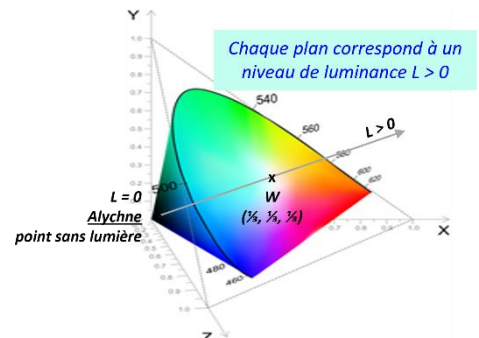
Figure 31 – Synthèses additive et soustractive : teintes primaires et secondaires, diagrammes de chrominance



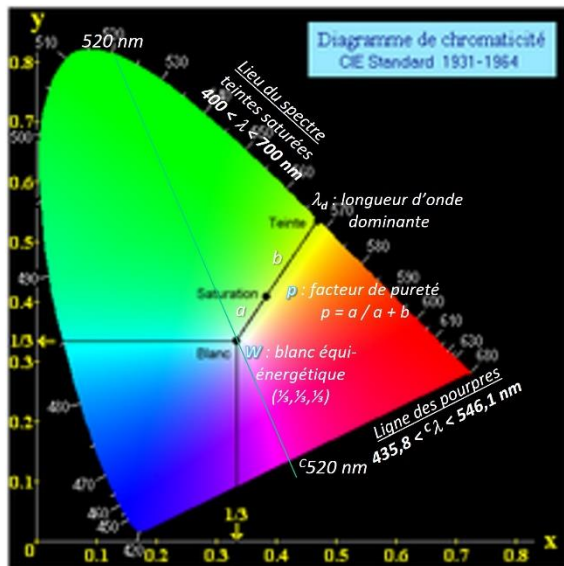
La **synthèse additive R, G, B** on superpose trois faisceaux de lumières colorées : les teintes primaires rouge, vert et bleu



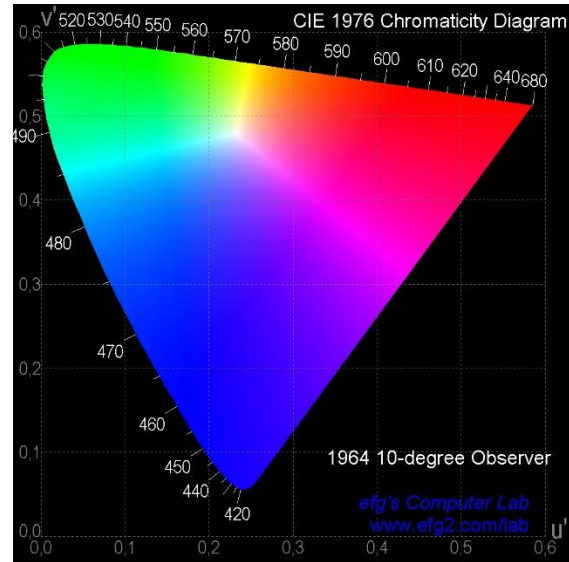
La **synthèse soustractive** on superpose trois filtres colorés dans un faisceau de lumière blanche qui traverse l'ensemble jaune, cyan et magenta



Représentation vectorielle de l'espace colorimétrique Les pourpres n'ont pas de λ , ils sont désignés par celle de leur teinte complémentaire exposée $^c\lambda$



CIE 1931



CIE 1976

L'enregistrement des premiers hologrammes fut réalisé en lumière monochromatique (LASERS à rubis et HeNe rouges) ce qui évitait d'aborder le problème de la superposition des couleurs. La photographie, le cinéma et la télévision en couleurs nous ont habitué à utiliser, peut-être inconsciemment, les procédés de trichromie. **On peut légitimement se demander si la technique est transposable à l'holographie** par addition de trois images monochromatiques respectivement rouge, verte et bleue. Sachant que l'enregistrement de plusieurs hologrammes dans un même substrat photosensible est possible moyennant quelques précautions peu contraignantes, peut-on superposer dans une même émulsion panchromatique (sensible sur l'entièreté du spectre visible) trois hologrammes enregistrés à chacune des longueurs d'onde utiles et observer une image 3D en vraies couleurs ?

42. Yvon Renotte, *La couleur : perception et reproduction*, leçon donnée à l'U3A - Liège (Université du Troisième Âge) le 3 mai 2016, x pages ; <https://hdl.handle.net/2268/258726> ; *La couleur, une question simple ?*, exposé donné le 19 juin 2015 à l'Université de Strasbourg (France) dans le cadre « 2015 année internationale de la lumière et des techniques utilisant la lumière – UNESCO » : "iCube en Lumière", Campus CNRS de Cronenbourg - iCube / CNRS, 89 slides

Lors de la restitution, on doit utiliser les trois radiations qui ont servi pour l'enregistrement et c'est là que la situation se corse ! Chacune des longueurs d'onde donnera une image bien nette pour l'hologramme lui correspondant, mais aussi deux images distinctes chez chacun des deux autres hologrammes, légèrement décalées et de tailles différentes (dans le rapport des longueurs d'onde concernées). Il résulte donc de ce processus neuf images plus ou moins décalées qui produisent inévitablement un flou dont il faudrait extraire les seules trois images composantes convenablement superposées. De nombreuses techniques et astuces ont été tentées dès le début des années '60, avec des succès divers avant d'obtenir des résultats de plus en plus acceptables jusqu'au début des années 2000 où l'on peut considérer que des hologrammes en vraies couleurs sont apparus.

En 1962, *Yuri Denisjuk* a proposé un procédé d'enregistrement d'hologrammes qui fait inévitablement penser à celui inventé par *Gabriel Lippmann* à la fin du 19^e siècle pour enregistrer et reproduire les couleurs par formation de « jeux de franges d'interférences stationnaires, monochromatiques », dans l'épaisseur de l'émulsion photosensible panchromatique. L'émulsion développée se comporte comme un filtre interférentiel capable de sélectionner les « oscillations monochromatiques » superposant « l'information couleurs » à l'image argentique 2D formée en surface, comme en « photographie classique ».

Les deux techniques paraissent effectivement fort semblables et on a tenté de les « faire cohabiter » dans l'espoir d'obtenir des hologrammes colorés. Des résultats acceptables ont été obtenus dans des conditions très strictes mais difficilement généralisables parce que les deux procédés présentent des différences structurelles qui les rendent difficilement conciliables.

En effet,

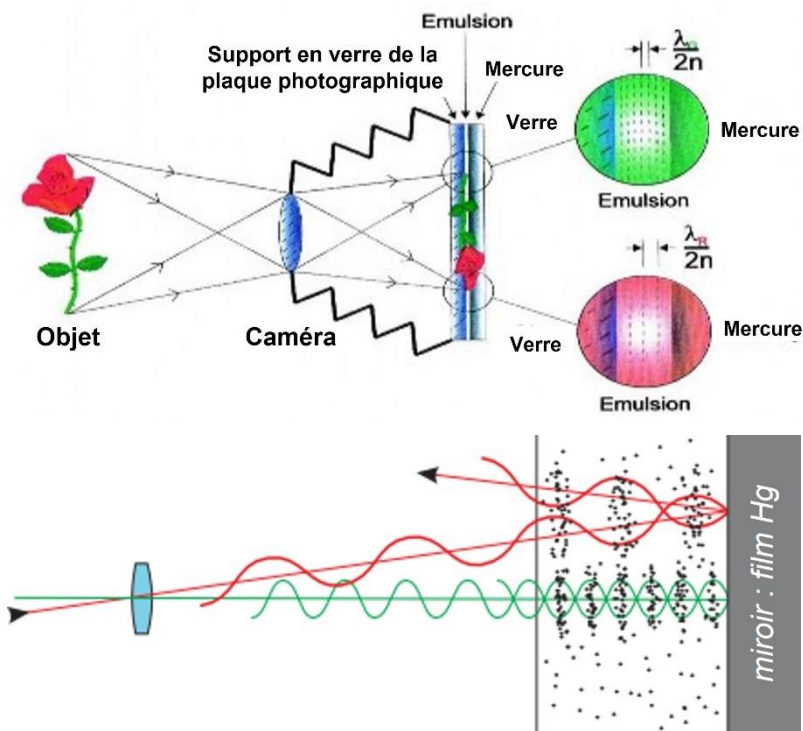
- *G. Lippmann* enregistre l'information couleur accompagnant l'image photographique 2D « classique » par *codage interférentiel dans l'épaisseur d'une émulsion* panchromatique à grains ultra-fins *, du système de franges résultant de l'onde stationnaire entre le front d'onde issu de l'objet photographié avec « son réfléchi » (sur un miroir métallique accolé à l'arrière de l'émulsion). Les objets sont photographiés en lumière blanche « naturelle ».
- *Y. Denisjuk* enregistre également par *codage interférentiel dans l'épaisseur d'une émulsion* l'information 3D résultant de l'interférence entre les fronts d'ondes issus des différents points de l'objet holographié, mais avec une onde de référence séparée et cohérente.

L'enregistrement des hologrammes est effectué en lumière cohérente monochromatique (si holographie couleurs : utilisation de trois LASERs monochromatiques). La lecture peut être faite en lumière blanche, l'hologramme se comportant en filtre interférentiel sélectionnant la fenêtre (souvent étroite) de radiations utiles, généralement différentes de celle d'enregistrement en raison du rétreint du matériau photosensible consécutif aux traitements post-exposition. Enregistré dans le rouge, l'hologramme lu en lumière blanche paraîtra jaune verdâtre.

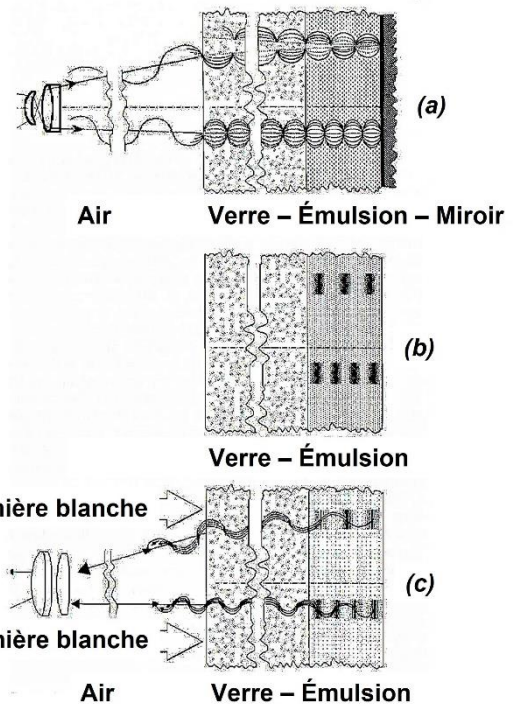
- *) On appelle « **grains** » les microcristaux d'halogénure d'argent dispersés dans la couche de gélatine, constituant l'émulsion argentique photosensible. Pour l'holographie, les grains sont « très petits » ce qui signifie qu'ils ont une taille de l'ordre de 10 à 100 nm, typiquement ~ 45 nm pour les HD de Agfa-Gevaert. Ils sont en outre sensibilisés chimiquement pour présenter un maximum de sensibilité spectrale dans la zone correspondant à la longueur d'onde émise par le LASER utilisé. Par exemple les émulsions Agfa-Gevaert 8E75-HD était sensibilisées pour le rouge ($\lambda < 750 \text{ nm}$), les 8E56 pour le vert ($\lambda < 560 \text{ nm}$).⁹

Même si les deux techniques paraissent fort analogues, il est évident qu'elles présentent des différences « physiques » importantes puisqu'en *photographie Lippmann*, le mode de production des franges par réflexion sur un miroir métallique produit un nœud au point de retour, donc un système de franges « liées ». Ce n'est pas le cas pour l'holographie en réflexion [Figures 32 et 33].

Figure 32 – Photographie Lippmann



Enregistrement : distribution des franges – ondes stationnaires au sein de l'émulsion



Principe de la photographie Lippmann ^{43,44}

- a) Configuration pour l'enregistrement : ondes stationnaires monochromatiques
- b) Émulsion développée : strates argentiques les plus épaisses correspondant aux maxima d'interférence
- c) Projection d'une photographie diffractant les couleurs interférentielles

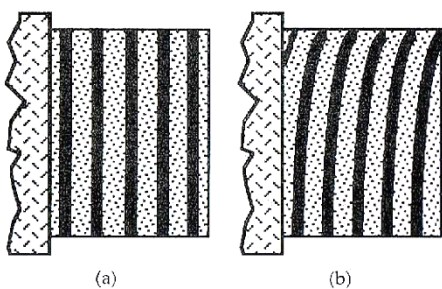


Gabriel Lippmann (1845-1921)
Physicien franco-luxembourgeois
Prix Nobel de Physique 1908



Photographie interférométrique de Lippmann (1891)

Figure 33 – Comparaison Photographie Lippmann – Hologramme Denisjuk ⁴³



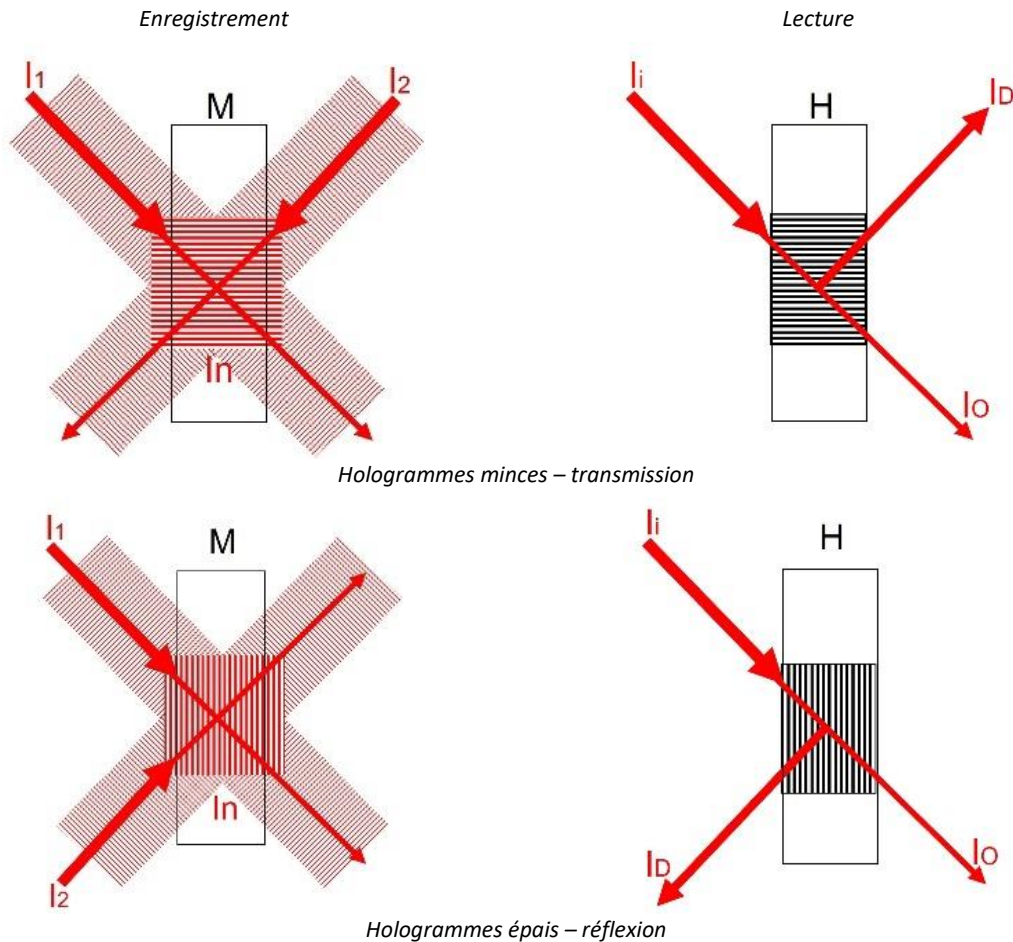
- a) Photographie Lippmann : les franges sont parallèles au miroir qui est enlevé après l'enregistrement
La distance $\lambda/4n$ du miroir au premier maximum d'énergie est fixe – le système de franges est lié
- b) Hologramme : les franges de la structure résonante ne doivent pas être liées au substrat ni lui être parallèles, il n'y a pas de miroir : le réseau de Bragg formant l'hologramme en volume peut se trouver n'importe où par rapport à la surface de l'émulsion
Les hologrammes n'ont pas besoin de caméra ni de lentille(s) pour être enregistrés contrairement aux photographies Lippmann

43. Jean-Marc Fournier and Paul L. Burnett, *Color Rendition and Archival Properties of Lippmann Photographs*, Journal of Imaging Science and Technology, 38, 6 (1994), 507-512
Alain Marraud et Jean-Marc Fournier, *Formation d'images accompagnées d'une analyse spectrale en champ complet : de J. Fourier à G. Lippmann*, Microscopy, Microanalysis, Microstructures – Les éditions de Physique, 8(1997), 37-39
Hans I. Bjelkhagen, *Lippmann Colour Photography*, June 9, 2017 ; <https://www.alternativephotography.com/lippmann-colour-photography/>

44. Pierre Noirard et Jean-Claude Grossetie, *Photochromie interférentielle Lippmann*, Rapport de Recherches 1994-95, European Commission – Joint Research Centre, 3D Image Processing Laboratory – ISPRA, Rapport EUR 16249 FR (1995), 75 pages

Avant d'aller plus loin, je dois introduire une nouvelle classification des hologrammes qui s'ajoute à celles décrites en introduction de la première question. Elle repose sur la comparaison de l'**interfrange** Δ séparant les strates correspondant à la distance entre les maxima d'interférence enregistrés dans la couche photosensible (de l'ordre du demi micromètre), et l'**épaisseur** d de cette couche (de l'ordre 5, 6 μm pour les émulsions usuelles).

Figure 34 – Hologrammes minces et épais



Enregistrement : I_1 et I_2 : faisceaux incidents, M : matériau photosensible, I_n : franges d'interférence
Lecture : H : hologramme, I_i et I_D : faisceaux incident et diffracté, I_0 : ordre zéro transmis

Du point de vue physique, l'hologramme développé étant un réseau 3D, il se comportera en **réseau de Bragg** (réseau en volume) si $\Delta \ll d$ et sera très sélectif en longueur d'onde. On dira que l'on a affaire à un **hologramme épais**, c'est le cas des **hologrammes de réflexion du type Denisyuk** dont les strates sont plus ou moins parallèles aux faces de l'émulsion. À l'inverse, les **hologrammes de transmission du type Leith-Upatnieks** sont appelés « **hologrammes minces** » peu sélectifs chromatiquement (éclairés en lumière blanche, il donne lieu à l'effet arc-en-ciel). Les strates du réseau sont globalement perpendiculaires aux faces du substrat ⁹.

Nous ne rediscuterons pas le cas des **hologrammes arc-en-ciel** [voir 1^{re} question] ni celui des **hologrammes minces de transmission** qui proposent des images dont les couleurs ne sont pas celles des objets réels puisqu'elles résultent simplement de la décomposition spectrale de la lumière les éclairant.

Les hologrammes de réflexion, épais – type Denisyuk, sont les plus aptes à reproduire la vraie couleur. Ils ne présentent aucun problème vis-à-vis de la géométrie d'enregistrement, la qualité des résultats ne dépend donc principalement que des caractéristiques du matériau d'enregistrement et des

conditions de traitement appliquées (développement et traitements post-exposition éventuels). Des précautions sont toutefois indispensables pour éviter divers problèmes inhérents aux propriétés des matériaux et à leurs traitements. Pour rappel, il faut

- éviter / réduire la diffusion qui se produit dans la zone bleue du spectre en raison de la taille des microcristaux,
- tenir compte de la réduction du rendement de diffraction consécutive à la superposition de plusieurs enregistrements qui réduit inévitablement la lisibilité finale,
- tenir compte et si possible empêcher / réduire le rétreint qui intervient au séchage du matériau et modifie la restitution des couleurs en rapprochant les franges d'interférence,
- enfin, il est nécessaire de sélectionner correctement les longueurs d'onde, donc les LASERs pour que leur combinaison fournisse le meilleur rendu possible des couleurs de l'objet holographié.

Dès les années '60, des essais et études ont tenté de surmonter les difficultés, avec des bonheurs divers. Néanmoins, la situation a peu évolué pendant la période '60 / '70. Il faut attendre les décennies '80 et surtout '90 pour que des innovations ouvrent des perspectives nouvelles.

Parmi la panoplie d'idées apparues, une des pistes fructueuse fut l'utilisation de sandwiches permettant d'éviter la superposition de plusieurs hologrammes dans une même couche en associant les particularités de matériaux d'enregistrement différents. Par exemple les deux premiers points évoqués supra furent contournés en associant une émulsion argentique (type 8E75HD) pour le rouge à une émulsion DCG pour le bleu et le vert. Une première étape, moins efficace, avait été l'usage de l'émulsion argentique 8E56HD au lieu de la DCG. Le troisième point fut contré par l'application de traitements « gonflants » (la gélatine) pré ou post-exposition, par exemple le sorbitol ou la TEA (triéthanolamine). L'holographe japonais *Toshihiro Kubota* et l'australien *P. Hariharan* furent parmi les premiers à obtenir de bons résultats ⁴⁵.

Quoi qu'il en soit, la technique du « sandwich », même si elle produit de bons résultats, reste difficile à mettre en œuvre. Dans les années '90, *Hans Bjelkhagen et al.* montrent qu'il est possible d'enregistrer la couleur en même temps que le relief en intégrant correctement les méthodes Lippmann et d'imagerie holographique en réflexion de Denisyuk, à condition de disposer d'une émulsion panchromatique à grains ultra-fins (12 à 20 nm – les émulsions russes *Slavich* proposent cette taille de grains *) de choisir correctement les LASERs utilisés pour l'enregistrement et de traiter les émulsions très précisément ⁴⁶. Les « *hologrammes Lippmann* », c'est ainsi qu'ils les appellent, sont « lisibles » en lumière blanche.

*) Slavich Joint Stock Company – Russie, www.slavich.com

Les travaux menés dans le cadre du projet européen *SilverCross* ont permis une avancée significative. Aujourd'hui, quelques sociétés proposent des émulsions holographiques « *full colour* » ou des photopolymères équivalents [voir § « *Matériaux pour l'enregistrement holographique* » et *Figure 34*]. En Russie, pays jadis producteur de matériaux très performants, restent deux sociétés, la *SLAVICH Joint Stock Company* et *Sphera-S* **. Ce dernier est actuellement un des meilleurs matériaux commerciaux disponibles pour l'holographie couleur panchromatique. Son principal client et fournisseur est *Geola uab* ** (Vilnius - Lituanie) où le film est utilisé pour production des hologrammes couleur imprimés numériquement, commercialisés sous le nom d'*i-Lumograms* © **.

***) *Sphera-S* Ltd, Russie : www.geola.com ; *Geola Digital uab*, Lituanie : www.geola.lt ; *Geola i-Lumogram*, UK; www.i-lumogram.blogspot.co.uk

45. Toshihiro Kubota and Teruji Ose, *Lippmann color holograms recorded in methylene-blue-sensitized dichromated gelatin*, Opt. Lett. 4 (1979), 289-291 ; <https://o.pg.optica.org/ol/abstract.cfm?URI=ol-4-9-289>
P. Hariharan, *Improved techniques for multicolor réflexion holograms*, J. Optics (Paris), 11 (1980), 53-55
Toshihiro Kubota, *Lippmann Color Holography*, J. Optics, 22 (1991), 267-274

46. Hans I. Bjelkhagen, Tung H. Jeong and Dalibor Vukicevic, *Color Reflection Holograms Recorded in a Panchromatic Ultrahigh Resolution Single-Layer Silver Halide Emulsion*, Journal of Imaging Science and Technology, 40, 2 (1996), 134-146

Figure 35 – Hologrammes en vraies couleurs



Dojo, poupée japonaise
T. Kubota, en couleurs naturelles
Musée de l'Holographie, Rencontre
entre Art, Science et Technologie ^a



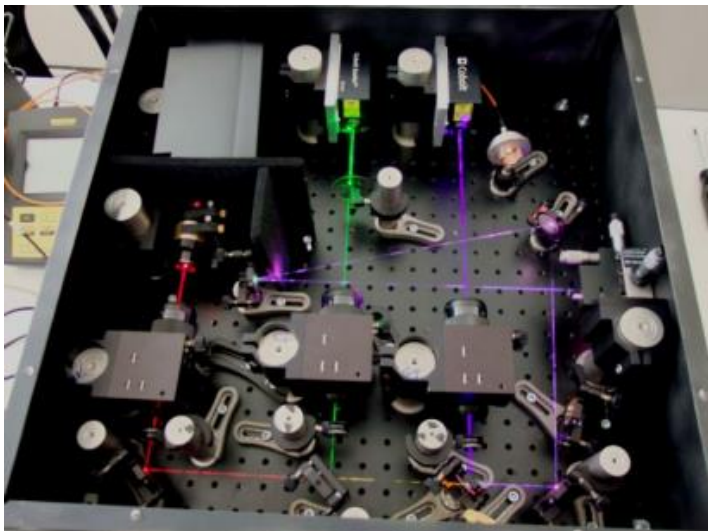
Hologramme couleur haute résolution
réalisé par Yves Gentet (F) ^b
The Ultimate Holography [®]
Taille des grains des émulsions
4 à 25 nm



Hologramme couleur haute résolution
réalisé par Hans Bjelkhagen (UK) ^c
Ultra-Realistic Imaging [®]
Taille des grains des émulsions : 20 - 25 nm
On notera la qualité du blanc
particulièrement difficile à reproduire

- a) https://www.echosciences-paca.fr/uploads/attachment/attached_file/23333706/Musee_vfranc_aise_web_compressed.pdf
b) Ultimate Holography, Bordeaux – France, <https://www.ultimate-holography.com/>
c) Colourholographic Ltd, London - UK; <http://colourholographic.com/>

Figure 36 – Enregistrement holographique en vraies couleurs



Prototype de caméra holographique RGB mobile



Hans I. Bjelkhagen
Holographiste anglo-
suédois
Glyndwr University
Wales – UK
Ultra-Realistic Imaging [®]



Yves Gentet
Holographiste français
Bordeaux – F
The Ultimate Holography [®]

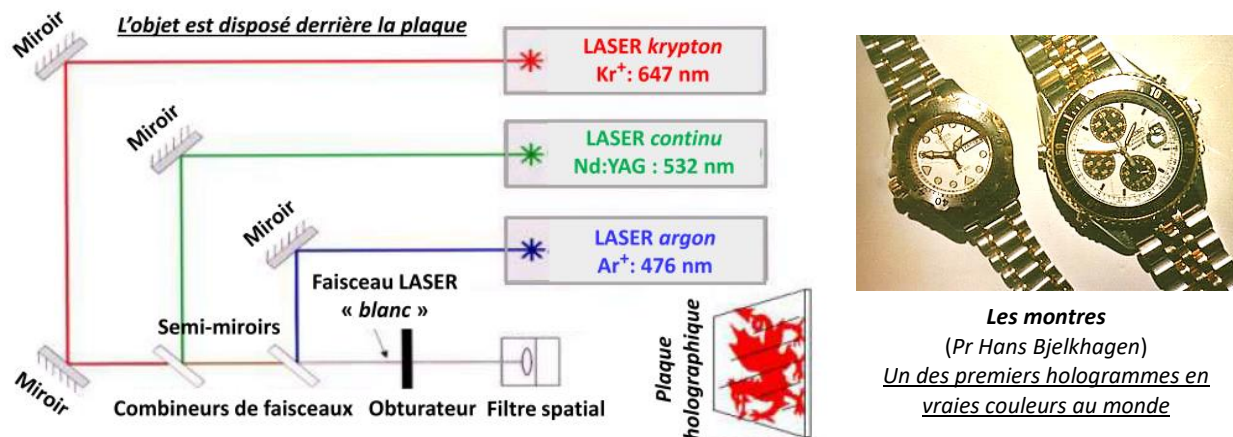
Pour l'enregistrement, *Bjelkhagen* ⁴⁷ préconise les longueurs d'onde $\lambda = 476 \text{ nm}$ (bleu : LASER à argon ionisé Ar^+), $\lambda = 532 \text{ nm}$ (vert : LASER Nd:YAG doublé en fréquence) et $\lambda = 647 \text{ nm}$ (rouge : LASER à krypton ionisé Kr^+) alors que *Gentet* utilise $\lambda = 476 \text{ nm}$ et 639 nm (bleu et rouge : LASERs à semi-

47. Hans Bjelkhagen and David Brotherton-Ratcliffe, *Ultra-Realistic Imaging : Advanced Techniques in Analogue and Digital Colour Holography*, CRC Press – 1st ed. (2013) ; <https://doi.org/10.1201/b14060>
Hans I. Bjelkhagen, *Ultra-realistic 3-D imaging based on colour holography*, 9th International Symposium on Display Holography, 25-29 June 2012, Cambridge, MASS-USA ; J. Phys : Conf. Ser. 415 (2013), 20 pages
Hans Bjelkhagen and David Brotherton-Ratcliffe, *Ultra-Realistic Imaging : a new beginning for display holography*, SPIE OPTO 2014, 25 February 2014, San-Francisco, CA-USA ; Practical Holography XXVIII : Materials and Applications, Proceedings Vol. 9006 (2014), 12 pages

conducteurs) et $\lambda = 532 \text{ nm}$. Les trois faisceaux sont superposés très précisément pour former ce que les auteurs appellent « un LASER blanc » [Figures 36 et 37].

Il existe aujourd'hui très peu d'entreprises ou d'institutions capables d'enregistrer et de produire des hologrammes couleur analogiques ou numériques en raison des coûts, notamment de la configuration d'enregistrement mais aussi de la difficulté relative pour se fournir en matériau d'enregistrement. Des sociétés pourtant actives et réputées ont cessé leurs activités. C'est le cas de *RabbitHoles Media Inc.* au Canada qui a pourtant produit de nombreux hologrammes numériques couleurs, artistiques et promotionnels, en particulier pour l'industrie cinématographique, dont l'hologramme *Avatar 2009* est un exemple.

Figure 37 - Schéma du dispositif d'enregistrement des hologrammes de réflexion en vraies couleurs



Les **hologrammes couleur générés par ordinateur**⁴⁷ constituent une catégorie particulière susceptible de rencontrer les desiderata d'un certain public.

Nous savons qu'il n'est pas (encore) possible de construire un hologramme généré par ordinateur (**Computer Generated Hologram**) riche d'un aussi grand volume d'informations que les hologrammes analogiques d'objets réels enregistrés au LASER. Afin d'approcher cette situation, un bon compromis est d'utiliser des stéréogrammes holographiques qui peuvent fournir des CGH de haute qualité. Le stéréogramme holographique est créé en utilisant une série d'images photographiques 2D, ou affichées sur un écran LCD (affichage à cristaux liquides), à partir duquel l'hologramme est enregistré. Afin d'obtenir une image holographique de haute qualité avec un grand champ de vision, de nombreuses images 2D sont nécessaires. Il est également possible d'utiliser un scanner laser pour obtenir des informations 3D sur l'objet afin de créer l'hologramme numérique. La société Geola exploite cette approche.

Figure 38 – Hologramme test d'une copie sur photopolymère (Geola Digital uab)



Les hologrammes numériques en couleur pourraient devenir de plus en plus populaires auprès des agences de publicité mais la capacité d'impression limitée rend encore difficile une croissance rapide du marché dans ce domaine. Des améliorations ont encore nécessaires y compris du côté matériel requis. Ainsi, le (nouveau) *photopolymère de Bayer* conviendrait à la production commerciale de masse d'hologrammes couleur à condition qu'il soit « aisément » disponible pour les sociétés d'affichage holographique. Geola a réalisé avec succès des tests d'hologrammes par copie contact sur ce matériau photopolymère. Un exemple d'hologramme de test copié est illustré à la figure 38.

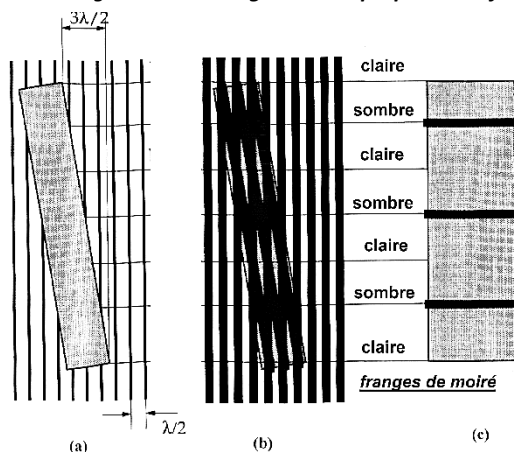
- *L'interférométrie accidentelle : le moiré « parasite »*

Dans les premières années, les holographistes professionnels et amateurs ont souvent constaté que leurs images étaient parasitées par des franges sombres, plus ou moins écartées, parfois tellement proches qu'elles rendaient les images floues. Il fallut attendre quelques années pour que la cause réelle de ce phénomène soit identifiée, et de parasite il devint source d'informations précieuses : on avait découvert sans le savoir le processus d'interférométrie holographique en temps moyenné et/ou en double exposition.

La durée des poses pouvant être de l'ordre de la seconde à quelques secondes, *divers phénomènes peuvent intervenir* pendant celle-ci, phénomènes entraînant des déplacements certes **micrométriques de tout ou partie(s) des objets holographiés**, mais susceptibles de déplacer suffisamment les franges d'interférence, bases de la technique d'imagerie holographique, au cours de l'enregistrement et de complexifier plus ou moins la figure de moiré résultant de la superposition des franges « bougées ».

Pour rappel, l'interfrange concerné est de l'ordre de 0,2 à 0,4 μm . Après compréhension et interprétation des mécanismes intervenant, il fut possible de développer les différentes techniques d'interférométrie holographiques. A la superposition temporelle « continue » des images lors de l'enregistrement correspond, à la restitution, une superposition d'images cohérentes entre elles et décalées les unes par rapport aux autres suivant une loi qui les relie à la position de l'objet à chaque instant. *La restitution fait ainsi apparaître simultanément toutes les images qui vont « interférer » entraînant un flou géométrique auquel se combine un système de franges caractéristiques du mouvement considéré. Ce sont ces franges que l'on exploite en métrologie.* Lorsque le déplacement devient trop important pendant l'enregistrement, les franges « parasitant » l'image se resserrent et peuvent la faire disparaître.

Figure 39 – **Analogie moiré optique - interférométrie holographique (cas de la double exposition)** ¹⁴



- a) Le sommet d'une barre métallique est incliné de 3 demi-longueurs d'onde par rapport à la verticale entre les deux expositions – la source LASER et l'observateur sont supposés être à l'infini sur la droite
- b) 1^{re} exposition : la barre verticale est « couverte » par des franges verticales distantes d'une demi-longueur d'onde correspondant au front d'onde incident
2^e exposition : après le tilt, les franges verticales initiales interagissent avec un nouveau système de franges. Il en résulte un « jeu » de franges de moiré identique à celui produit par interférence entre les deux premiers
- c) La figure de moiré résultante apparaît sous forme de franges alternativement claires et sombres sur la surface de la barre

Sans entrer dans trop de détails, *les principales causes* de « déplacements parasites » sont

- *mécaniques* : la forme de chacun des éléments d'un montage évolue avant d'atteindre un équilibre statique de l'ensemble. De même, les chocs et vibrations extérieures, mécaniques et acoustiques se transmettent par les milieux entourant le montage notamment le sol et l'air ambiant, ce qui implique une bonne isolation du site d'enregistrement.

- *thermiques* : des variations de températures, même faibles, de quelques degrés, autour des objets et du dispositif d'enregistrement peuvent perturber suffisamment l'environnement et faire apparaître des inhomogénéités thermiques sources de franges parasites.

Le simple contact des doigts du manipulateur produit une élévation locale de température et une déformation du substrat par dilatation. Très faible, cette déformation s'atténue progressivement en tendant vers l'équilibre thermique et peut générer des franges parasites. De même, les turbulences de l'air produisent des variations de l'indice de réfraction, donc des variations de phase gênantes des chemins optiques responsables d'artéfacts. La simple présence de l'opérateur peut produire de telles perturbations, il faut en tenir compte !

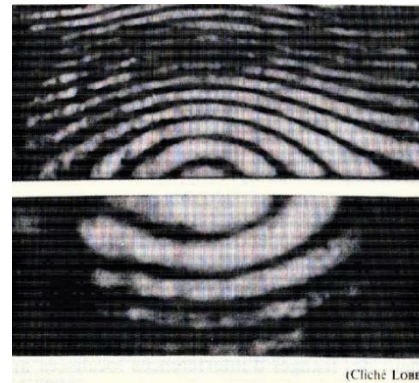
Un cas « inattendu » intervient lors de l'enregistrement holographique « d'éléments » du corps humain. Les battements du cœur, de l'ordre de 60 à 80 par minute, produisent un déplacement périodique de la surface de la peau en rythme avec les contractions cardiaques : *le mouvement balistique du corps* dont l'amplitude est de l'ordre de 0,1 mm. Si la pose n'est pas suffisamment courte par rapport à l'intervalle entre deux battements, ceux-ci engendreront des franges « disgracieuses » à la reproduction. Le rythme respiratoire, 12 à 20 cycles par minute chez l'adulte, peut produire des effets analogues. Le phénomène a été exploité à des fins artistiques par des holographistes professionnels.

Des considérations précédentes, il ressort clairement que ***l'enregistrement holographique de portraits requière une expertise spécifique***. La sensibilité des matériaux photosensibles habituellement (argentiques et/ou photopolymères) utilisés associée aux courts temps de pose nécessitent l'usage de LASERs puissants. Mais l'usage de LASERs puissants implique des risques oculaires et cutanés dont il faut absolument se prémunir pour éviter d'éventuels accidents. Les LASERs pulsés permettent de surmonter les « contraintes contradictoires » évoquées moyennant un strict respect des précautions lors de l'enregistrement⁹.

Figure 40 – Exemples de figures d'interférométrie « accidentelles » (double exposition)⁴⁸



a) **Cause mécanique** : micro-déplacement intervenu pendant l'enregistrement – la direction du glissement est perpendiculaire aux franges qui parasitent l'image holographique



b) **Cause thermique** : déformation de la plaque photosensible entre les deux prises de vue, provoquée par l'élévation locale de température par un doigt du manipulateur. Le refroidissement progressif s'accompagne d'un rétreint micrométrique variable du substrat

48. Jean-Charles Viénot, Paul Smigielski et Henri Royer, *Holographie optique – Développements, Applications*, Dunod – Paris (1971), 84-90
<https://actu.univ-fcomte.fr/article/voyage-dans-la-troisieme-dimension-002470#.Y5zly3bMKM8>



Figure 40 c) **Causes mécanique et thermique conjointes**

Au printemps 1976, le LOBE (Laboratoire d'Optique de Besançon) réalise l'image en volume de la **Vénus de Milo** grâce à une très bonne copie envoyée par le musée du Louvre ; elle est présentée à l'exposition universelle de Tokyo en 1977 – c'est le plus grand hologramme au monde : la prouesse technique est extraordinaire mais malgré des conditions de stabilité exceptionnelles, d'inévitables gradients thermiques combinés aux tailles de l'objet et du substrat entraînent des micromouvements responsables des franges qui strient l'image holographique

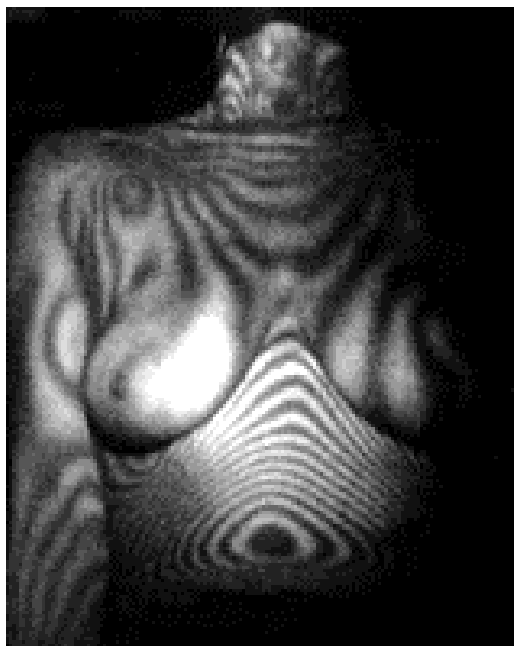
Pendant quelques dizaines d'années, le LASER à rubis (synthétique) $[Al_2O_3:Cr - \text{oxyde d'aluminium dopé au chrome}]$ fut un outil idéal, offrant une solution élégante (ce fut d'ailleurs une de ses principales applications) jusqu'à ce qu'il soit progressivement remplacé par le LASER Nd:YAG $[Nd:Y_3Al_5O_{12} - \text{grenat d'yttrium et d'aluminium dopé au néodyme}]$ doublé en fréquence qui se comporte de façon similaire en *mode pulsé* mais avec des énergies de seuil de pompage plus faibles, donc plus intéressantes^{49,50}.

49. https://fr.wikipedia.org/wiki/Laser_%C3%A0_rubis ; https://fr.wikipedia.org/wiki/Laser_Nd:YAG

50. Marc Ferretti, *Les LASERS*, Collection scientifique contemporaine, 2^e éd. (1976)

René Dändliker, *Les LASERS, principe et fonctionnement*, Presses polytechniques romandes (1982)

Figure 41 – Interférogrammes de tout ou partie du corps humain



Mouvements thoraciques visualisés par interférométrie holographique – double exposition ⁵¹

<https://theconversation.com/de-nouvelles-technologies-pour-la-mesure-des-pulsations-cardiaques-110856>



1985 : Autoportrait holographique de **Margaret Benyon** (1940-2016) - artiste peintre britannique une des premières à utiliser l'holographie comme support C'est également un exemple d'hologramme à deux canaux (on s'est arrangé pour voir les deux images superposées) ⁵²

<https://www.globalimages-hologramartcollection.com/margaret-benyon>

En holographie ⁵³

- Les **LASERS à rubis** utilisés donnent une émission dans le rouge (longueur d'onde $\lambda = 694,3 \text{ nm}^*$) avec une durée d'impulsion de quelques dizaines de nanosecondes (20 à 50 ns*) pour une énergie allant de quelques dizaines de millijoules à 10 joules suivant les modèles.
- Les **LASERS YAG** utilisés émettent dans l'infrarouge ($\lambda = 1,06 \mu\text{m}$). Après doublage en fréquence par un cristal . . . on obtient une émission dans le vert ($\lambda = 532 \text{ nm}$). Ils ont une cadence de répétition allant jusqu'à 50 Hz qui les rend apte à la ciné-holographie comme vu précédemment. Suivant les modèles, les impulsions ont une durée de 7 à 15 ns et une énergie de quelques dizaines à quelques centaines de millijoules (mJ). On notera que ce type de LASER fonctionne aisément en *mode déclenché* avec des performances exceptionnelles (240 kilowatts, cent cinquante fois par seconde).

(*) Rappels : 1 ns (nanoseconde) = 1 milliardième de seconde (10^{-9} s)

Les photographes caractérisent la réponse des émulsions argentiques par une courbe indiquant la variation de la *densité optique D* (le niveau de noircissement) en fonction du logarithme décimal de la variation de la quantité d'éclairement Q_E (l'énergie reçue par unité de surface). C'est la **courbe de H&D** [Ferdinand Hurter (1844-98) et Vero Charles Driffield (1848-1915)], base de la sensitométrie. Elle a une allure caractéristique [Figures 42 et 43]. Théoriquement Q_E s'exprime en joules par mètre carré (en lux fois seconde [$lx \cdot s$] en unités photovisuelles), pratiquement en microjoules par centimètre carré [$\mu J / \text{cm}^2$]. La densité D n'a pas de dimension : c'est le logarithme décimal de l'inverse de la transparence T ,

51. Eugene Hecht, *Optics*, Chap. 13.3 - *Holography*, Pearson Education Ltd, 5th ed. (2017), 652-667

52. Margaret Benyon, *Defining Tradition 1969-1996 : Living and working in Holography*, Art in Holography 2, International Symposium, Witley Press Ltd – Norfolk, UK (1996) ; <https://www.art-in-holography.org/papers/benyon.html>

53. Paul Smigielski, *Holographie industrielle*, Teknea s.a. Toulouse (1994), 44-47

elle-même rapport des flux lumineux émergent ϕ_o et incident ϕ_i d'un faisceau sonde traversant un élément de surface de la plaque photographique développée⁵⁴.

Les holographistes préfèrent utiliser des courbes plus « réalistes » $T_a = T_a (\log_{10} Q_E)^9$, proches du processus holographique : les courbes de variation du transfert de l'amplitude T_a en fonction de la variation de Q_E .

$$D = \log_{10} \frac{1}{T} \quad ; \quad T = \frac{\phi_o}{\phi_i} = 10^{-D} \quad ; \quad T_a = \sqrt{T} = 10^{-D/2}$$

En réalité, T_a est une grandeur complexe qui doit s'écrire :

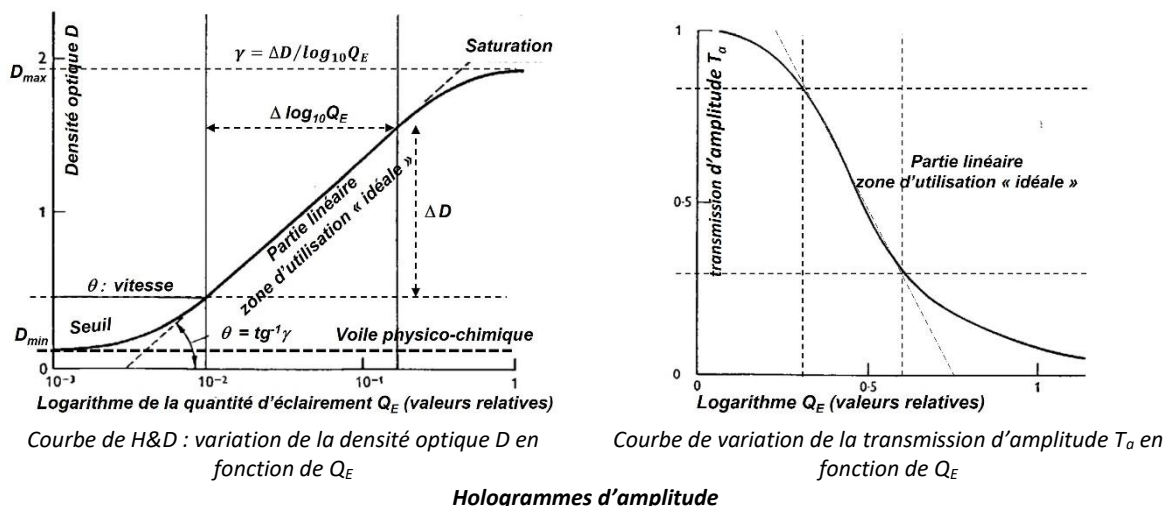
$$T_a = |t_a| e^{-\alpha(x)d} e^{-i\varphi_t(x)} = |t_a| e^{-\alpha(x)d} e^{i2\pi nd/\lambda(x)}$$

où $|t_a|$ est la composante réelle de T_a , α et n sont respectivement le coefficient d'absorption constant et l'indice de réfraction du matériau, d est l'épaisseur traversée et λ la longueur d'onde du faisceau LASER utilisé pour l'enregistrement et la lecture. Deux cas extrêmes existent correspondant à deux types d'hogrammes [voir 1^{re} question] :

- l'hogramme d'amplitude « pur » : ($\varphi_t(x) = \text{constante}$), seul $\alpha(x)$ varie en fonction de Q_E (après post-traitement) ;
- l'hogramme de phase : $\alpha = 0$, $|t_a| = 1$, n et d peuvent varier ce qui correspondra soit à un hogramme de phase « pur » ($d = c^{\text{te}}$ et $\Delta\varphi_t \div \Delta n$) ou à hogramme de phase en relief de surface ($n = c^{\text{te}}$ et $\Delta\varphi_t \div \Delta d$).

N.B. Il est possible de transformer un hogramme d'amplitude enregistré dans une émulsion argentique en lui appliquant un traitement supplémentaire après « développement classique » : le blanchiment. L'opération convertit l'argent des microcristaux dispersés dans le substrat-gélatine, formant l'image argentique, en micro-clusters d'un sel d'argent transparent dont l'indice de réfraction est supérieur à celui de la gélatine. L'hogramme de phase ainsi obtenu présente généralement un très bon rendement de diffraction $\eta = I_d/I_i$ (rapport de l'intensité diffractée dans le premier ordre I_d à l'intensité incidente I_i)⁵⁴.

Figure 42 – Courbes sensitométriques « typiques » des émulsions photographiques



54. Pierre Glafkidès, *Chimie et physique photographiques*, Publications Photo-Cinéma Paul Montel, 4^e éd. Revue et corrigée (1976)

Pawel Kowaliski, *Théorie photographique appliquée*, Masson et Cie éd. (1972)

<https://www.souvenirsdephotographe.fr/technique/Hurter-Driffield.html>

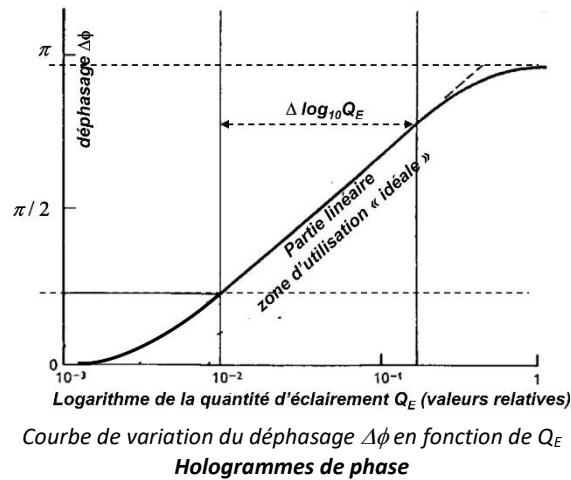
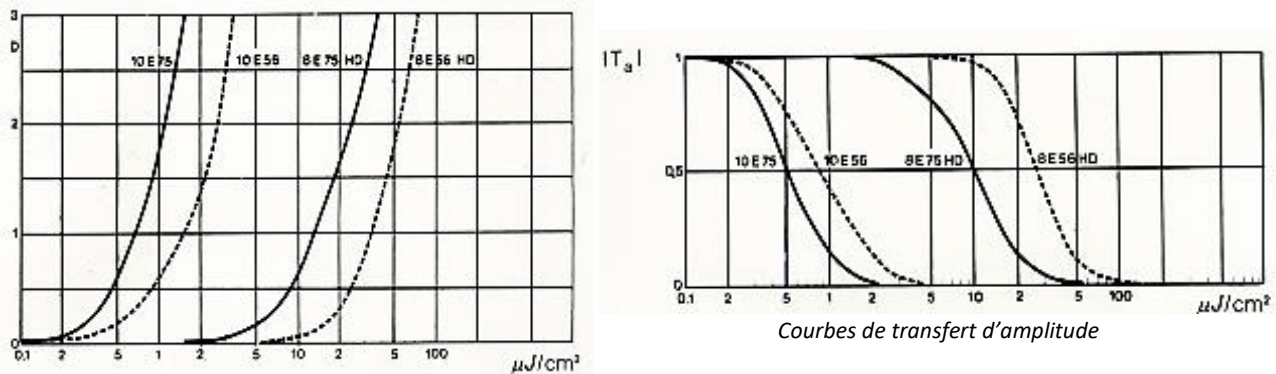


Figure 43 – Exemples de *courbes caractéristiques d'émulsions holographiques commerciale Agfa-Gevaert Holotest 10E75 ; 10E56 ; 8E75HD ; 8E56HD*⁵⁵



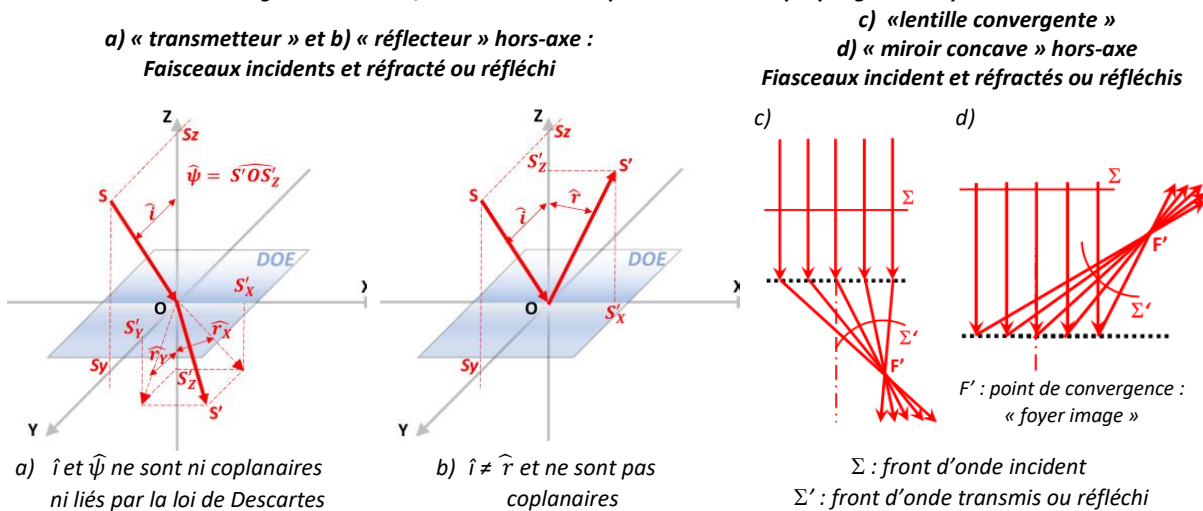
- Les HOEs (Holographic Optical Eléments : composants optiques holographiques) et coHOES (computer generated HOEs : calculés par ordinateur)

Les hologrammes peuvent être utilisés comme composants optiques : ce ne sont plus de simples lentilles de Fresnel ou réseaux zonés, ils se sont développés rapidement et tendent à remplacer les optiques classiques (lentilles, prismes, miroirs, . . .) dans un nombre croissant d'applications ne fut-ce qu'en raison de leur poids et leur encombrement nettement plus faibles à qualité égale. Rappelons « qu'un gramme coûte très cher dans l'espace ! ». Ce sont des composants « exotiques » au sens propres, « qui sortent de la norme » : Ils réalisent des opérations inaccessibles à l'optique conventionnelle, non seulement statiques mais aussi dynamiques, ainsi que des fonctions qui paraissent violer les lois de l'optique géométrique (réflexion, réfraction sous des angles n'obéissant pas aux lois de Snell-Descartes) [Figure 44], pas celles, « plus larges », de l'optique diffractive. Citons les HUD (Head up Display), viseurs tête-haute dans les avions et éléments de pare-brise automobile permettant aux pilotes et aux conducteurs d'observer le tableau de bord en accommodant sur l'infini, sans quitter le paysage des yeux. Ou encore les lecteurs de code-barre, les réseaux particulièrement performants pour la spectroscopie, . . . et la liste est loin d'être limitative. Associés à des afficheurs LCD (cristaux liquides) ou LEDs, ils peuvent effectuer des opérations plus ou moins complexes en

55. <http://edwesylostudio.com/Materials/AgX/Agfa/Holotest217289677.pdf> ; [AgfaBrochure 8E75 HD.PDF](#)

manipulant par exemple les états de polarisation de la lumière : ce sont des interrupteurs optiques, des multiplexeurs / démultiplexeurs, des capteurs optiques, des commutateurs / adresseurs, des *filtres électro-optiques*⁵⁶ pour la reconnaissance de formes et le stockage de données, à mode de substrat mono et multi-couches très sélectifs, à résonance de mode guidé et de plasmons de surface⁵⁷, pilotables : *autant de composants qui participent le développement « exponentiel » de la photonique*. Combinés / accolés à des composants « classiques », ils *corrigent des défauts* (aberrations) et *améliorent les performances des composants hybrides* dans lesquels ils sont inclus, par exemple des objectifs d'appareils et/ou d'instruments, ou des concentrateurs solaires⁵⁸.

Figure 44 – DOEs / HOEs n'obéissant pas aux lois de l'optique géométrique



Des composants tels ceux illustrés aux figures 44 et 45 peuvent être aisément construits « analogiquement » par interférence entre deux faisceaux correctement choisis. Ils peuvent aussi être

56. Vincent Moreau, *Intégration de systèmes d'interconnexions optiques reconfigurables*, thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Physiques, Université de Liège (16-11-2001)

Vincent Moreau, Yvon Renotte, Yves Lion, Serge Habraken, *Substrate-mode polarization-controlled optical switch with sandwich reflection holograms*, OSA (Optical Society of America in cooperation with SPIE) – Summer Meeting (8 – 12 Jul) – Hawaii, USA, Technical Digest Series, Vol.10 (1998), 53-55

Vincent Moreau, Yvon Renotte, Yves Lion, *Planar-integrated interferometric sensor with holographic gratings*, Photonics West 2000 (23 – 28 Jan), San-Jose – Ca, USA, Diffractive / Holographic Technologies and Spatial Light Modulators VII, SPIE Vol. 3951 (2000), 108-115

Cédric Lenaerts, *Etude et réalisation de filtres spectraux – Application à la résonance de mode guidé et à la résonance de plasmons des surface*, thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Physiques, Université de Liège (30-09-2005)

Cédric Lenaerts, Vincent Moreau, Yvon Renotte, Yves Lion, *Narrow band-width wavelength filter by guided mode resonance*, Optical Engineering, 43 (2004), 2631-2639

Cédric Lenaerts, Fabrice Michel, Vincent Moreau, Bernard Tilckens, Yvon Renotte, Yves Lion, *High Transmission efficiency for surface plasmon resonance by use of dielectric grating*, Applied Optics, 44 (2005), 6017-6022

57. https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sonance_plasmon_de_surface

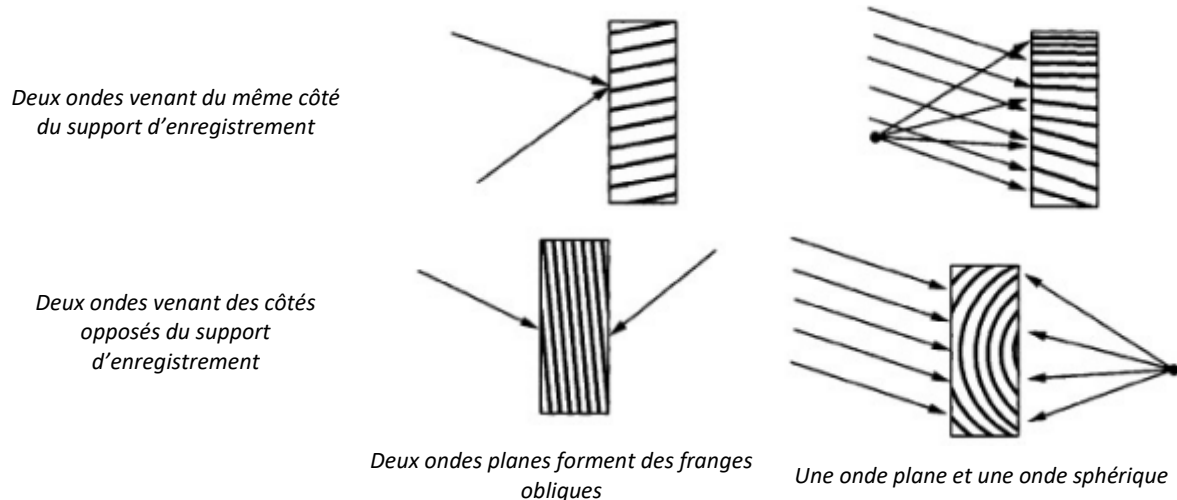
58. Fabian Languy and Serge Habraken, *Performance comparison of four kinds of flat nonimaging Fresnel lenses made of PC and PMMA for concentrated photovoltaics*, Opt. Lett. 36 (2011), 2743-2745

Fabian Languy, Karl Fleury-Frenette, Cédric Lenaerts, Jérôme Loicq, D. Regaert, T. Thibert and Serge Habraken, *Flat Fresnel doublets made of PMMA and PC: combining low cost production and very high concentration ratio for CPV*, Optics Express 19, (2011)A280-A294

Fabian Languy and Serge Habraken, *Hybrid Lens for Solar Concentration: Optimization of the Multilayer Diffractive Lens*. Poster session presented at Renewable Energy and the Environment Congress - Optics for solar energy (SOLAR), Eindhoven, Netherlands (2012)

construits « analytiquement » par transfert-copie de l'image 2D d'un réseau pixellisé (calculé ou non) « dessiné » sur un calque transparent. Le réseau ainsi construit est donc une image 2D d'une structure diffractive qui peut entraîner un comportement 3D, éventuellement la formation d'une image 3D. Nous sommes en présence d'un comportement paradoxal : le « **principe holographique** » qui présente la particularité de permettre l'enregistrement de l'informations 3D dans un substrat 2D. Nous verrons ultérieurement que ce principe a généré des réflexions dépassant le simple contexte de l'imagerie holographique jusqu'à concerner la cosmologie.

Figure 45 - Orientation des franges d'interférence dans un support d'enregistrement



Nous allons utiliser un des cas précédents pour comparer les caractéristiques et comportements de composants équivalents construits par les deux méthodes évoquées. Nous allons considérer le cas d'un réseau diffractif, peut-être le plus anciennement connu, la **lentille de Fresnel** : en quelque sorte l'ancêtre de ce type de composant. Comme son nom l'indique, c'est une lentille à échelons * qui a été conçue par *Augustin Fresnel* (1788-1827) au début du 19^e siècle (1822) pour palier le poids prohibitif des lentilles classiques de grandes dimensions, utilisées dans les phares de marine, remplacer les miroirs et améliorer le rendement photométrique [Figure 46]. Elle fonctionne comme les hologrammes, nous les appelons ici « *composants diffractifs* », en « *relief de surface* » décrits à la première question. Son équivalent analogique peut être obtenu par interférence entre un front d'onde plan et un sphérique éclairant le matériau photosensible par les faces opposées. Le réseau ainsi « imprimé » dans le substrat a une distribution caractéristique [Figure 47]. Il peut être d'amplitude ou de phase selon le matériau enregistreur, et même être produit en « relief de surface » dans les *photorésines*. Son « *quasi-équivalent analytique* » est le *réseau zoné* (1876) de *Jacques-Louis Soret* (1827-90) * qui est en réalité une *lentille convergente à foyers multiples* formée d'anneaux concentriques noirs et blancs (transparents) alternés. Les rayons des cercles tracés au compas sur un film transparent varient comme les racines carrées des nombres entiers successifs. En noircissant de deux en deux les intervalles compris entre ces circonférences, on obtient un réseau à centre clair (positif) ou sombre (négatif) selon le choix adopté [Figure 47]. Les deux types donnent les mêmes résultats. Le processus est détaillé dans plusieurs ouvrages spécialisés⁵⁹.

*) https://fr.wikipedia.org/wiki/Lentille_de_Fresnel
<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/optiondu/soret.html>

59. Maurice Françon, *Holographie*, Masson et Cie, Recherche Appliquée – Maîtrise de Physique et Écoles d'Ingénieurs (1969), 23-26 ; *Optique, formation et traitement des images*, Masson et Cie (1972), 34-38
 Albert Kastler (Prix Nobel de Physique 1966), *Optique*, G. Bruhat – *Cours de Physique générale*, Masson et Cie (1959), 173-176
 Eugène Hecht, *Optics*, Pearson Education Limited, 5th ed. (2017), 518-519

Figure 46 – Lentille à échelons de Fresnel et son équivalent « réfractif »

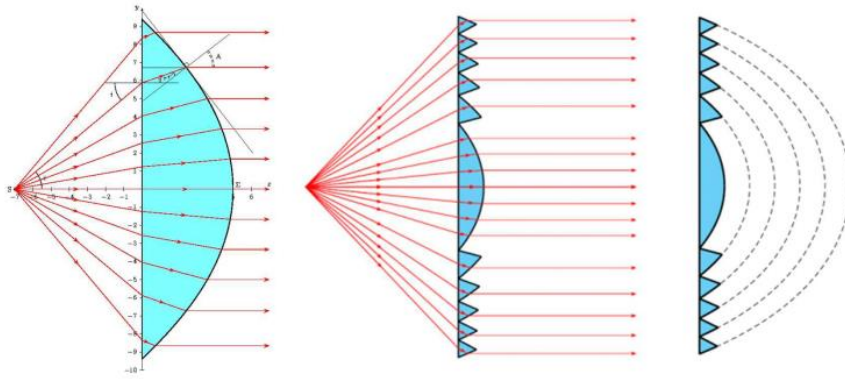
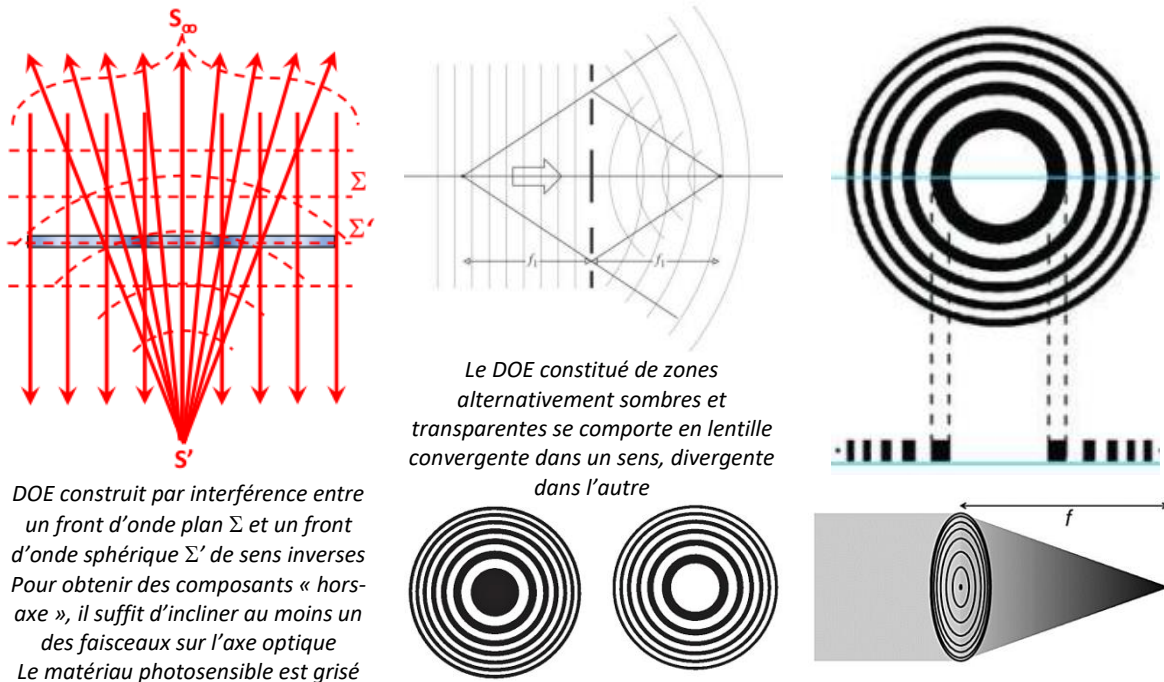


Figure 47 – Réseau zoné de Soret



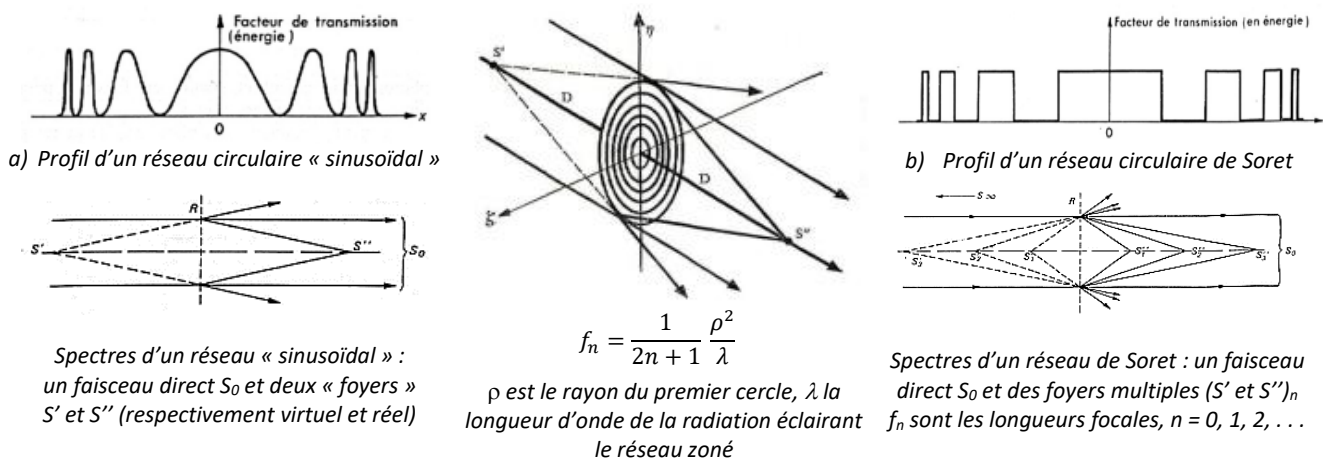
Nous avons qualifié les composants ci-avant décrits de quasi-équivalents parce qu'ils présentent une différence de comportement « fondamentale » déjà évoquée : le réseau zoné a plusieurs foyers alors que le réseau analogique, de même que la lentille de Fresnel, n'en a qu'un comme une lentille réfractive [Figure 48]. Par simplicité, la figure proposée illustre le cas d'un réseau de phase. Celui d'un réseau d'amplitude est semblable à une constante près (transparence « moyenne » du matériau), ce qui n'affecte pas le raisonnement.

Sans (trop) entrer dans une démonstration analytique, on peut rendre compte assez correctement de la différence entre les comportements évoqués ci-avant en se référant à l'introduction de la transformée de Fourier dans la théorie de la diffraction par le physicien français Pierre-Michel Duffieux (1891-1976) dans les années 1943-46, développée ultérieurement par Joseph Goodman⁶⁰. Rappelons qu'un signal en créneau peut être représenté comme la somme d'une sinusoïde fondamentale ayant la même fréquence que le créneau plus une suite d'harmoniques sinusoïdales dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale. Il en résulte que chaque terme se comportant

60. Pierre-Michel Duffieux, *The Fourier Transform and its Applications to Optics*, Wiley Series in Pure and Applied Optics, 2nd ed. (1983)
Joseph W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, The Mac-Graw-Hill Cie Inc., 2d ed. (1996)

comme un réseau circulaire analogue à celui de la figure 48 (a), donne deux « images » de la source symétriques par rapport au réseau.

Figure 48 – Spectres diffractés d'un faisceau incident de rayons monochromatiques parallèles, normaux au plan du réseau ⁵⁹



La comparaison entre les profils en créneau et sinusoïdaux permet d'aborder le cas des hologrammes synthétiques / calculés. Connaissant le front d'onde incident (initial) et la configuration de la figure de diffraction recherchée, le problème consiste à construire, calculer, la structure diffractante qui permettra de formater le premier pour obtenir la seconde. Cette structure sera imprimée sur un substrat transparent sous forme d'une distribution 2D d'amplitudes, pixellisée pour utiliser une technique d'impression courante.

Nous avons vu que l'hologramme d'un point est représenté par des franges d'interférence sinusoïdales. Les variations d'intensité entraînent des variations du contraste des franges. Il existe une correspondance biunivoque entre la position et la luminosité du point objet et l'amplitude et la phase dans le plan de l'hologramme. Et cela est vrai pour tous les points d'un objet constitué d'un ensemble de points qui correspondra donc à un ensemble de systèmes d'interférences superposés. Nous avons signalé que l'analyse harmonique d'une mire créneau se représente simplement par la superposition de « mires sinusoïdales », d'harmoniques, moins complexe que l'hologramme « sinusoïdal ». Réduire la sinusoïde à un créneau de même pas (fréquence) constitue une « approximation » brutale qui présente le risque de perte d'information mais surtout ici l'avantage d'éviter les demi-teintes pour ne conserver que les noirs et blancs, c'est-à-dire une image binaire parfaitement adaptée au calcul sur ordinateur. Il résulte de cette approche que l'approximation choisie remplace dans une région d'un hologramme une superposition de sinusoïdes par une superposition de créneaux. Pour ne pas perdre (trop) d'information, il faut donc coder les paramètres caractéristiques des sinusoïdes, amplitudes et phases, sous forme d'une « carte binaire » plus complexe que la simple superposition de créneaux : c'est l'hologramme binaire ⁶¹. Le procédé consiste à d'abord échantillonner convenablement l'image à réaliser et ensuite calculer l'amplitude et la phase du front d'onde à enregistrer. Le plan de l'hologramme est divisé en autant de cases que l'on a choisi de points pour échantillonner le front d'onde et, en chaque case, on code l'amplitude et la phase de la façon suivante : la case est complètement noircie à l'exception d'une ouverture rectangulaire dont la largeur l est constante, la hauteur h proportionnelle à l'amplitude de l'onde, et l'écart d par rapport au centre proportionnel à la phase. Quand toutes les cases ont ainsi été remplies à l'aide d'un traceur commandé par ordinateur, l'hologramme est photographié. On conçoit aisément que les dimensions de l'ouverture puissent coder l'amplitude photographique : c'est le principe du diaphragme de l'œil ; le déplacement d de l'ouverture

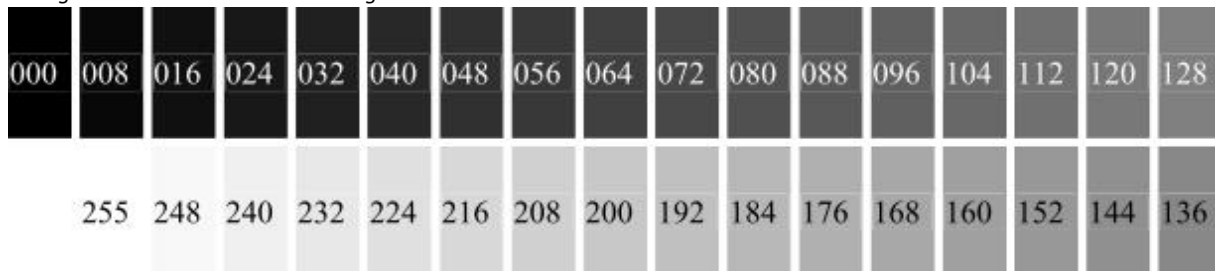
61. Jean-Charles Viénot, Paul Smigielski et Henri Royer, *Holographie optique – Développements, Applications*, Dunod – Paris (1971), 188-193

code la phase en introduisant un déphasage supplémentaire δ pour les ondes qui l'ont traversée. D'autres méthodes de codage de la phase existent, nous ne les détaillerons pas ici ⁶².

La technique permet des résultats surprenants tels que fournir l'image 3D d'un objet purement imaginaire !

Des étapes ultérieures exploiteront 256 niveaux de gris (0 pour le noir, 255 pour le blanc – intensité lumineuse maximale / transparence complète) ce qui permet d'augmenter la précision, la qualité de la restitution offerte par le composant digital. En ajoutant la couleur, le codage se fera sur les trois couleurs de base.

Codage en noir et blanc : niveaux de gris



Codage en couleurs

couleur	noir	nuance de noir	rouge	vert	bleu	gris	blanc
R	0	0	255	0	0	128	255
V	0	0	0	255	0	128	255
B	0	1	0	0	255	128	255

Nous avons signalé la possibilité de réaliser des hologrammes de phase ⁶². Cette technique peut être appliquée aux hologrammes synthétiques qui prennent alors le nom de **kinoforms**. La première étape de leur réalisation consiste toujours à calculer après échantillonnage l'amplitude et la phase de l'onde composite à enregistrer. Ensuite, et toujours par calcul, on ramène toutes les amplitudes au même niveau et on module la phase à 2π près de façon que toutes ses valeurs soient comprises entre 0 et 2π . Cette information est enregistrée sous forme de variations d'épaisseur, comme pour d'autres hologramme de phase. *Dans un kinoform, l'information portée par l'amplitude est perdue, ce qui peut être gênant mais en revanche, il est beaucoup plus lumineux qu'un hologramme d'amplitude.*

On entend de plus en plus fréquemment évoquer les **écrans holographiques** ⁶³. Il s'agit d'une technique d'affichage qui n'a d'holographique que la qualification. Elle est bidimensionnelle et utilise des supports en verre revêtus de microlentilles moulées comme surface de projection d'un rétroprojecteur. L'effet résultant est un affichage en espace libre, le support de l'image étant transparent. *Les lentilles peuvent être utilisées pour manipuler le faisceau et donner l'impression que l'image flotte devant ou derrière le verre*, plutôt que directement dessus. Cependant, cet affichage n'est que bidimensionnel et « n'a que l'air d'être tridimensionnel ». Il peut être interactif.

Initialement conçu à des fins publicitaires, ce type d'écran est souvent utilisé lors de concerts : **il simule l'illusion d'un artiste virtuel projeté holographiquement**. Combiné à la *réalité virtuelle augmentée*, cet outil fournit un média très performant, fort prisé dans des mondes aussi divers que variés : le jeu, le spectacle, l'art, l'éducation, le marketing, l'industrie, l'aérospatiale, la médecine, l'armée . . . et la liste

62. Olivier Garnier, *Holographie*, 19 pages ;

http://olivier.granier.free.fr/PC-Montesquieu445072/cariboost_files/Hologramme.pdf

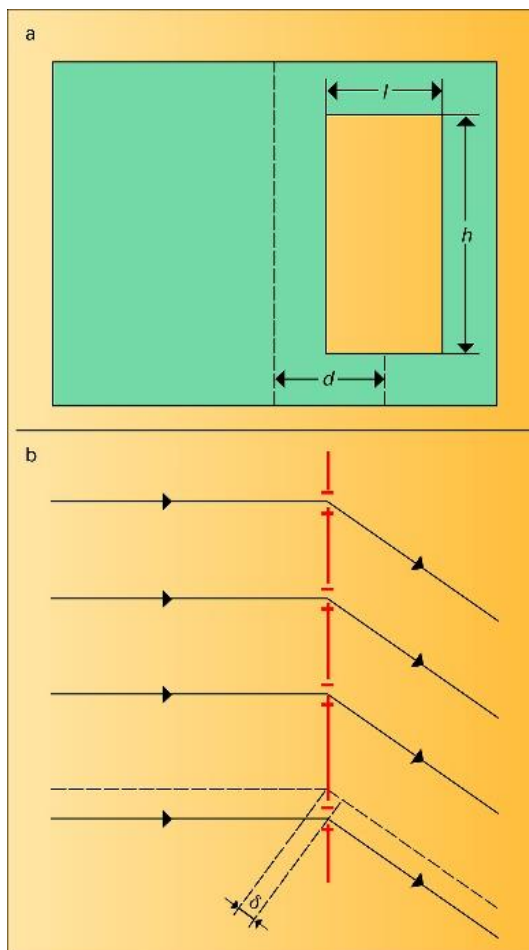
Lionel Jacobowicz, *Hologrammes synthétisés par ordinateur - Depuis la découverte du laser et des premiers calculateurs vers les applications les plus récentes*, Cahiers techniques « Comprendre » - Photoniques 74 (2014), 47-52 ; [Holo synthétiques photon201474p47.pdf](http://holo.synthetiques.photon201474p47.pdf)

63. https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89cran_holographique

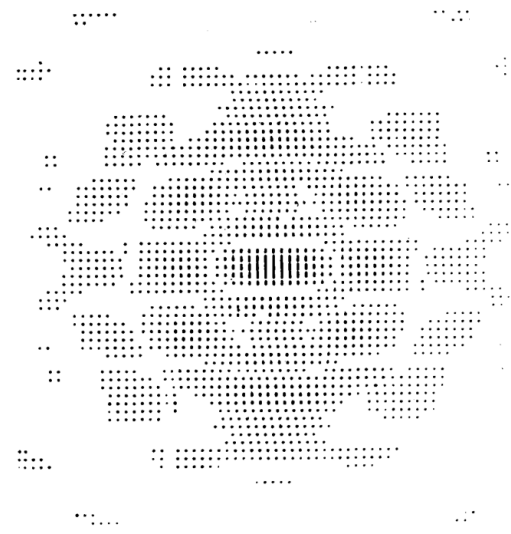
<https://animations-innovantes.fr/lecran-holographique-et-les-realites-virtuelle-et-augmentee/>

n'est pas limitative ! Plusieurs de ces domaines ont été évoqués précédemment à propos du futur de l'holographie.

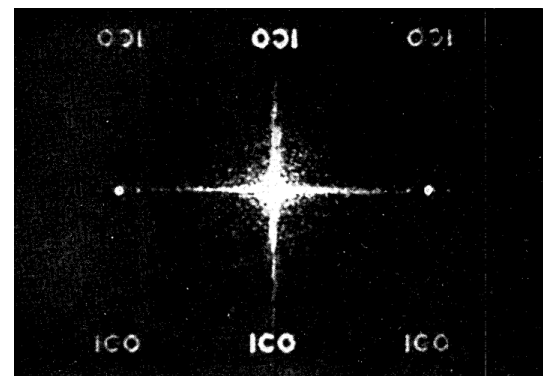
Figure 49 – **Hologramme synthétique binaire** ⁶⁴



Codage d'un hologramme synthétique binaire

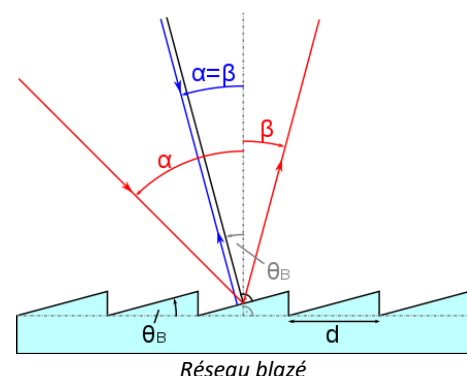


Hologramme binaire du texte ICO



L'image reconstruite

Au « chapitre des curiosités », notons encore les **réseaux blazés** (échelette) ⁶⁵ qui sont des réseaux plans ayant un profil en dents de scie et fonctionnant en réflexion. L'incidence par rapport aux facettes est donc égale à l'angle de gravure du réseau. Contrairement aux réseaux classiques pour lesquels le maximum d'intensité se produit pour l'ordre 0 (qui donne une image non dispersée de la source), le spectre le plus intense est dans le cas considéré d'ordre non nul. Un choix correct de l'angle de taille permet de concentrer un maximum d'énergie lumineuse dans un ordre



Réseau blazé

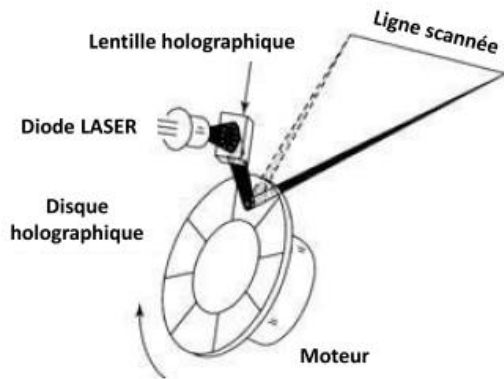
64. A. W. Lohmann, D. P. Paris, *Binary Fraunhofer Holograms, Generated by Computer*, Appl. Opt. 6 (1967), 1739-1748 ; <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-6-10-1739>

Pierre Fleury et Michel Henry, *Holographie – Hologramme binaire*, Encyclopædia Universalis France S.A. (2005) ; <https://www.universalis.fr/media/V110556/>

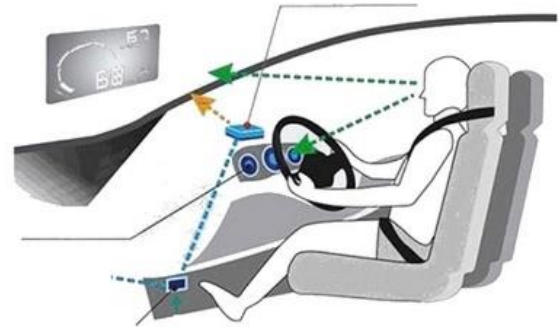
65. https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau_%C3%A9chelette

non nul (pour lequel il y a dispersion en fonction de la longueur d'onde) et d'obtenir ainsi un spectre beaucoup plus lumineux qu'avec un réseau classique.

Figure 50 – Exemples d'application des composants optiques holographiques dans des systèmes optiques



Scanner à disque holographique



Fonctionnement de l'affichage tête haute Head Up Display : schéma simplifié



Exemple d'affichage tête haute dans l'automobile



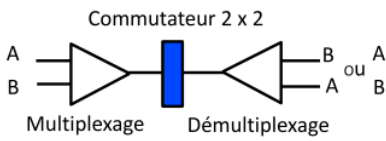
Exemple d'affichage tête haute dans l'aviation

Des logiciels de plus en plus performants ont été créés et sont aujourd'hui disponibles. Ils sont capables de calculer des composants (HOEs, DOEs - *éléments optiques diffractifs*, coHOEs et coDOEs) même relativement complexes intervenant ou non dans des dispositifs et instruments. Ils sont couramment utilisés dans les centres de recherche (le Centre Spatial de Liège et Advanced Mechanical and Optical Systems pour ne citer que ces deux sociétés locales).

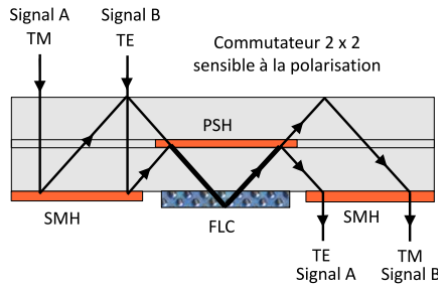
La technologie permet de construire des composants dont les structures sont de taille sensiblement inférieure à la longueur d'onde de la lumière se propageant dans le matériau. Les réseaux d'ordre zéro (Zero Order Gratings) ont des périodes inférieures à la longueur d'onde de la lumière qui les éclaire ce qui leur confère des comportements spécifiques : l'un des principaux avantages d'une telle structure est qu'elle ne propage que les ordres zéro aussi bien en transmission qu'en réflexion. Sous forme annulaire (*coronagraph vortex retarders*), de tels réseaux introduits dans des télescopes participent à / facilitent la détection des exoplanètes⁶⁶.

66. Dimitri Mawet, Cédric Lenaerts, Pierre Riaud, Jean Surdej, Serge Habraken et Denis Vandormael, *Use of subwavelength gratings in TIR incidence as achromatic phase shifters*, Optics Express, 13 (22) - (2005), 8686-8692
 Christian Delacroix, *Exoplanet imaging with mid-infrared vector vortex coronagraphs : design, manufacture, validation and first light of the annular groove phase mask*, thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Physiques, Université de Liège (25-06-2013)
 Pierre Piron, Pascal Blain, Marc Décultot, Dimitri Mawet and Serge Habraken, *Polarization Holography for Vortex Retarders Recording: Laboratory Demonstration*, Applied Optics, 54 (15) – (2015), 4765-4770

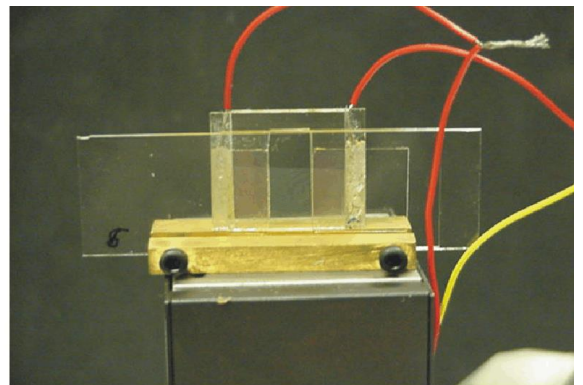
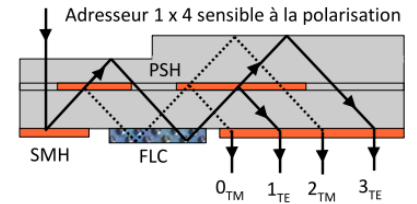
Figure 51 – Exemples de composants dynamiques : a, b et c : schémas de principe ; d : réalisation



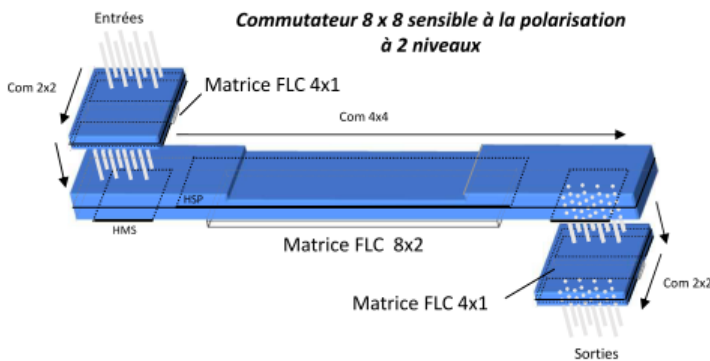
a) Multiplexeur – démultiplexeur : principe



b) Etats de polarisation TE et TM : modes transverses électrique et magnétique
SMH : hologramme à mode de substrat ; PSH : hologramme sensible à la polarisation ; FLC : cellule à cristaux liquides ferroélectriques⁵⁶

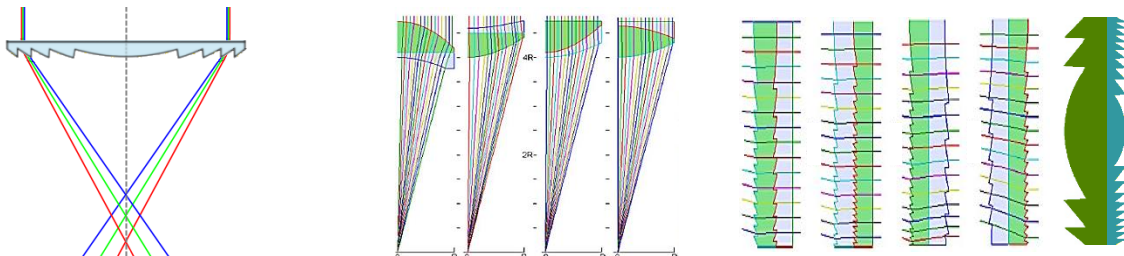


d) Commutateur optique constitué de HOEs et d'une cellule à cristaux liquides ferroélectriques⁵⁶



c)

Figure 52 – Exemples d'applications de coHOEs pour la recherche spatiale⁵⁸



Achromatisation de lentilles hybrides réfractives et diffractives pour concentrateurs solaires

Avec une lentille simple, les courtes longueurs d'onde convergent plus vite que les grandes : le foyer est donc une tache relativement large, non homogène spectralement, ce qui amoindrit le rendement des cellules photovoltaïques

Le but est de **diminuer la taille du spot focal** et de rendre le **flux atteignant la cellule le plus homogène possible spectralement** (le plus blanc)

Solution : étude comparative **Multicouches réfractif / réfractif et hybrides réfractif / diffractif** : divers cas

Solution : étude comparative **Lentilles hybrides formées de doublets de Fresnel** : divers cas

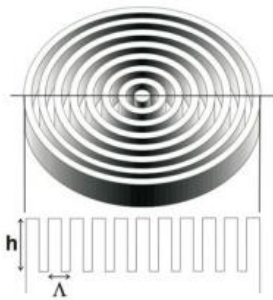
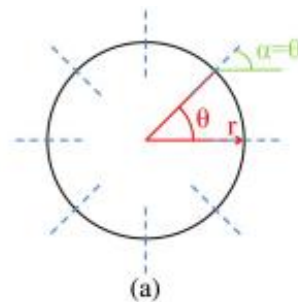
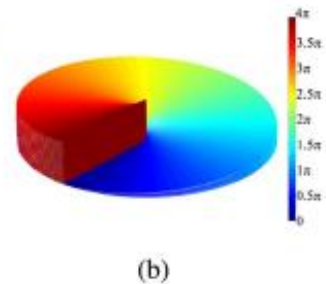


Schéma de principe du masque de phase à rainure annulaire (AGPM)⁶⁶



Représentation d'un vortex retardateur de phase et de la phase du faisceau transmis

a) variation de l'axe rapide, en pointillés bleus, il tourne le long du centre pour une rotation totale de 2π



b) distribution de phase d'un faisceau transmis par le vortex

- Vivons-nous dans un Hologramme ?



Stephen W. Hawking
(1942-2018)

Cosmologiste britannique
University of Cambridge - UK

En 2001, le physicien britannique **Stephen W. Hawking** (1942-2018), éminent cosmologiste, spécialiste de la relativité générale, promoteur de « la théorie du Tout », publie un deuxième ouvrage de vulgarisation : *L'Univers dans une coquille de noix*⁶⁷ dans lequel il résume ses réflexions quant à l'origine et l'évolution de l'Univers. Il y expose que la physique quantique travaille au développement d'une *théorie holistique de notre univers suggérant que celui-ci peut être comparé à un hologramme géant* car l'information du tout



L'Univers dans une coquille de noix

existe dans chaque partie constituante : chaque particule contient toutes les informations relatives à tout ce qui existe ou existera.

Le concept peut surprendre et paraître résulter plus d'une réflexion philosophique que physique. Il mérite néanmoins quelques explications et commentaires ne fut-ce qu'en raison de l'exceptionnelle notoriété de son auteur.

En fait, ce n'est pas l'holographie comme processus d'enregistrement et de restitution d'images en relief intégral qui est considérée mais le « **principe holographique** » qui présente la particularité de permettre l'enregistrement de l'informations 3D dans un substrat 2D (en réalité, le substrat a trois dimensions mais la troisième, l'épaisseur, est nettement inférieure aux deux autres). *Même un fragment minuscule de plaque holographique en 2 dimensions contient assez d'informations pour reproduire l'image complète en 3 dimensions de l'objet holographié.* Par extrapolation, on pourrait imaginer qu'une correspondance analogue entre des concepts de la physique théorique pourrait ouvrir la voie à une interprétation de notre univers en moins de dimensions⁶⁸.

L'analogie a commencé lorsque des théoriciens ont étudié comment un trou noir « grossit » lorsqu'une « information » (au sens large : le terme désignant aussi bien un « paquet » d'énergie que de matière) tombe dedans. Paradoxalement, c'est sa surface et non son volume qui grossit proportionnellement à la quantité reçue . . . ce qui est totalement différent de la plupart des autres objets connus dans l'univers. Chez la plupart de ceux que nous connaissons, c'est le volume qui augmente « d'une unité » et la surface seulement d'une fraction s'il « *consomme un bit d'information* ». Avec les trous noirs, la situation est inversée : *c'est comme si l'information n'était pas à l'intérieur du trou noir, mais plutôt collée à sa surface !* Ainsi un trou noir, objet entièrement tridimensionnel dans notre univers tridimensionnel, peut être complètement représenté uniquement par sa surface bidimensionnelle . . . et c'est ainsi que fonctionnent les hologrammes. *Curieusement un phénomène se produisant dans un univers à trois dimensions d'espace se réduit à deux dimensions.* En tentant d'unifier les différentes forces de l'univers dans un cadre théorique unique, d'autres théoriciens ont découvert qu'il est plus simple de résoudre le problème dans un univers 2D que dans l'univers « classique » en 3D. Dans les deux cas, la 2D suffit ce qui a fait penser à un hologramme, « support en 2D » (moyennant la remarque relative à son épaisseur) qui contient une information 3D⁶⁹.

67. Stephen W. Hawking, *L'Univers dans une coquille de noix*, éditions Odile Jacobs - Sciences (2001), 60-99
https://fr.wikipedia.org/wiki/Stephen_Hawking

68. Paul Sutter, *Are we living in a Hologram ?*, Space.com (January 29, 2018) ; <https://www.space.com/39510-are-we-living-in-a-hologram.html>

Lee Smolin, *La révolution inachevée d'Einstein : au-delà du quantique*, Dunod éd. (2019) : *L'hypothèse holographique*, 251-255

69. Yaël Nazé, *Astronomie de l'étrange, Individus singuliers, Objets bizarres, Idées insolites*, Belin éditeur (2021), 334-336

Il ne faut toutefois pas oublier qu'il s'agit en quelque sorte d'un « tour de passe-passe » mathématique permettant de résoudre un peu plus simplement un problème fort compliqué dans un modèle (sans gravité ni expansion) très éloigné du nôtre. *Cette approche ne signifie nullement que notre univers est réellement en 2D avec une 3D qui n'est qu'illusion : il ne faut pas confondre le territoire et sa carte, . . . la réalité avec une équation simplifiée.* Un artifice mathématique, aussi pratique soit-il, ne dicte pas nécessairement notre vision de la nature fondamentale de la réalité. ***Si les principes holographiques sont utiles pour résoudre des problèmes, cela ne signifie pas nécessairement que nous vivons dans un hologramme. Et même si nous vivions dans un hologramme, nous ne serions pas nécessairement capables de faire la différence de toute façon.*** Ne nous faisons pas d'illusion, la réalité complexe nous échappe certainement.

Du point de vue strictement optique, on peut objecter que les hologrammes sont des structures spatiales inscrites dans des volumes dont une des dimensions, l'épaisseur, est certes beaucoup plus petite que les deux autres . . . mais pas vraiment négligeable. Alors, peut-on consoler cette réalité physique avec le concept suggéré par S. Hawking qui insiste et base son raisonnement sur le fait que l'holographie permet de restituer des informations en 3D alors qu'elles ont été enregistrées et sont stockées dans un composant holographique en 2D ?

Conservant à l'esprit que son propos concerne principalement le *principe holographique*, on peut effectivement concevoir et réaliser des composants holographiques qui n'ont réellement que deux dimensions. Ces composants, souvent assez « simples », sont inscrits dans un plan et permettent d'effectuer des opérations en photonique. Je citerai pour l'exemple les **coHOEs** (computer generated holographic elements) construits sur mesure pour corriger les aberrations de composants optiques classiques (réfractifs) tels des objectifs d'instruments, . . . ou simplement une lentille plate de Fresnel. Ces composants, peu encombrants, peuvent être répliqués aisément donc produits industriellement à bon compte. Ils sont ainsi très intéressants pour la construction spatiale : des collègues du CSL [*Centre Spatial de Liège*] et chez AMOS [*Advanced Mechanical and Optical Systems - Liège*] sont spécialisés en la matière. Cette catégorie d'hologrammes ont la particularité de pouvoir être inscrits en surface sur un substrat, y compris sur des microcircuits. Bien entendu ce type de composants ne permet pas de construire des images 3D complexes, telles une scène, on n'en est pas encore là !

. . . *Quoi que !*

Craig Hogan, professeur à l'Université de Chicago et *directeur du Fermilab Center for Particle Astrophysics, Laboratoire qui étudie l'interface de la physique des particules et de la cosmologie*, est connu pour sa théorie du « *bruit holographique* » qui soutient que le *principe holographique* [axiome dans les théories des cordes et propriété supposée de la gravité quantique qui stipule que la description d'un volume d'espace peut être considérée comme codée sur une limite de dimension inférieure à la région] peut impliquer des fluctuations quantiques qui conduiraient à un « *bruit holographique* » mesurable par les détecteurs d'ondes gravitationnelles ⁷⁰.

Il imagine et construit *l'holomètre au Fermilab* qui serait l'interféromètre LASER le plus sensible au monde. Théoriquement, il serait capable de détecter des fluctuations holographiques d'un *seul attomètre* ($1 \text{ am} = 10^{-18} \text{ mètre} = 1 \text{ trillième de mètre}$). De telles détectons, si elles s'avéraient, auraient un impact considérable : *ce serait une première preuve que l'espace-temps, le tissu même de l'univers, est quantique*. L'holomètre qui est en réalité composé de deux interféromètres identiques, a commencé à collecter des données en août 2014. Après une année de collecte, **les résultats** de l'expérience publiés le 3 décembre 2015 **ont révélé que l'espace-temps n'est pas quantifiable à l'échelle mesurée** ⁷¹ et n'apportent pas la preuve que « nous vivons dans un hologramme » ⁷².

70. [Craig Hogan - Wikipedia](#) ; [Holographic principle - Wikipedia](#) ; <https://astro.uchicago.edu/people/craig-j-hogan.php> ; [Observatoire d'ondes gravitationnelles — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)

71. <https://www.wired.com/2010/10/holometer-universe-resolution/> ; [Holomètre \(Fermilab\) — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#) ; [Holometer rules out first theory of space-time correlations \(fnal.gov\)](#)

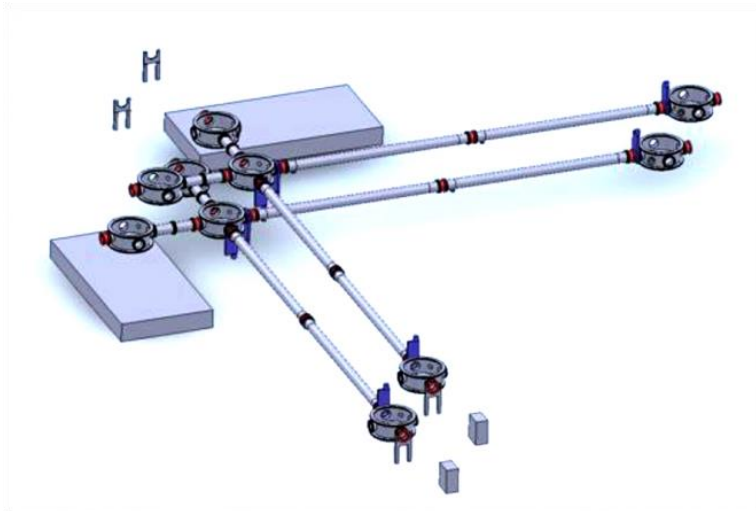


Figure 53 – L’Holomètre du Fermilab

Constitué d’un doubleinterféromètre LASER

Chaque interféromètre en forme de L a deux bras perpendiculaires de 131 pieds de long [~ 40 mètres]



Craig Hogan

Indépendamment, des interféromètres LASER « gigantesques » ont été construits : le duo **Ligo** (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*) aux États-Unis, à Livingston - Louisiane et à Hanford - Washington, et **Virgo** (*d’après l’amas de la Vierge*) en Europe – franco-italien près de Pise. Ils ont des bras de plusieurs kilomètres : respectivement 4 et 3 kilomètres et sont donc extrêmement sensibles, ils peuvent détecter des variations inférieures à $10^{-21}m$ (= 1 *zm*, zeptomètre = 1 trilliardième de mètre). Le 15 septembre 2015 à 11h51, ils ont détecté une onde gravitationnelle pour la première fois : **la découverte a été annoncée officiellement le 11 février 2016** ⁷³.

À ma connaissance, Craig Hogan poursuit ses travaux en relativité générale et cosmologie quantique au Fermilab.



Emmeth Leith, Steve Benton et Yuri Denisyuk

<https://www.museeholographie.com/>

72. <https://news.uchicago.edu/story/do-we-live-2-d-hologram> (26 août 2014)
<https://www.science.org/content/article/controversial-experiment-sees-no-evidence-universe-hologram> (3 décembre 2015)

73. B.P. Abbott et al. (Ligo Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*, Phys. Rev. Lett. 116 (2016), Phys. Rev. Lett. 116, 061102 – 16 pages ;
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>

- **Applications**

- *Le stockage d'informations* : les matériaux, les techniques, la réinscription ...

- **Annexes**

- *Les imagerie 2D et 3D*

- *La photographie* : Rappels - Historique, processus et matériaux

<http://hdl.handle.net/2268/258714>

- *Le relief* : perception et reproduction

- *La stéréoscopie* : anaglyphes et al.

<http://hdl.handle.net/2268/258674>

- *L'holographie*

<http://hdl.handle.net/2268/258668>

- *Les avatars électroniques* et al.

<http://hdl.handle.net/2268/258667>

<http://hdl.handle.net/2268/258699>

<http://hdl.handle.net/2268/264862>

<https://hdl.handle.net/2268/289846>

<https://hdl.handle.net/2268/260666>

- *Des matériaux pour l'enregistrement holographique*

- *Les prérequis* : rappels et contraintes

- *Le matériau idéal*

- *Les différents types de matériaux*

- *L'école de photographie de Liège* – collaborations IRSIA avec Agfa-Gevaert n.v.

- *La Photographie* : un peu d'histoire

<http://hdl.handle.net/2268/263242>

- *La collaboration IRSIA avec Agfa-Gevaert n.v.*

<http://hdl.handle.net/2268/258714>

- *Les halogénures d'argent – émulsions primitives*

<http://hdl.handle.net/2268/260565>

- *Le HOLOLAB* : 30 années de recherches en Holographie . . . et quelques succès

- *Les matériaux photosensibles* : le projet *SilverCross* – l'holographie en vraies couleurs

- *La métrologie optique et holographique* : *De Karnak (Haute-Egypte) à Seraing (CMI Group)* : les projets *OSIRIS – DEIOS* à *MINT*

<http://hdl.handle.net/2268/259746>

<http://hdl.handle.net/2268/263246>

- *Virtual Leodium* : *Maquette virtuelle de la ville de Liège au dix-huitième siècle* (2011-04-13); Archéométrie 2011 - Colloque du GMPCA – CEA ULg, Liège, 11-15/04/2011

<http://hdl.handle.net/2268/89315>

- *Les composants optiques* : la *Luminette* © : *au croisement de la lumniothérapie et de la photonique*

<http://hdl.handle.net/2268/258701>

<http://hdl.handle.net/2268/258743>