

# HOLOGRAPHIE

## Sommaire

- Introduction
- Cohérence en optique
- Holographie : principe et réalisations
  - ○ Principe
  - ○ Réalisations
  - ○ Matériaux d'enregistrement
  - ○ Copies d'hologrammes
  - ○ Hologrammes de Fourier
  - ○ Hologrammes synthétiques
- Applications de l'holographie
  - ○ Images holographiques
  - ○ Composants optiques
  - ○ Interférométrie
  - ○ Traitement optique de l'information
- Bibliographie

## Les auteurs

- **Pierre FLEURY**, directeur honoraire de l'Institut d'optique théorique et appliquée de Paris, professeur honoraire au Conservatoire national des arts et métiers
- **Michel HENRY**, agrégé de sciences physiques, docteur ès sciences, maître de conférences à l'université de Paris-VI-Pierre-et-Marie-Curie
- ,
- ,



### **Dennis Gabor recevant le prix Nobel**

Dennis Gabor (1900-1979), Hongrois émigré en Grande-Bretagne, a reçu le prix Nobel de physique, en 1971, pour l'invention de l'holographie.

Crédit :  
Hulton Getty

*Tous les documents proposés par Encyclopædia Universalis  
sont légalement autorisés pour l'usage pédagogique*

---

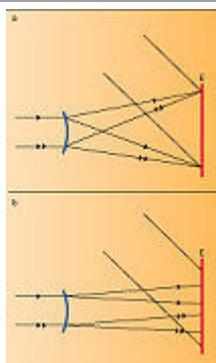


### Dennis Gabor

Le physicien britannique d'origine hongroise Dennis Gabor (1900-1979), à gauche, reçoit des mains du roi de Suède Gustave VI Adolphe le prix Nobel de physique en 1971 pour l'invention de l'holographie.

Crédit :  
Hulton Getty

*Tous les documents proposés par Encyclopædia Universalis  
sont légalement autorisés pour l'usage pédagogique*



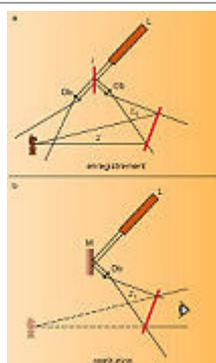
### Hologramme : fonctionnement

En a, chaque point d'un objet diffusant envoie de la lumière en tous les points de l'hologramme E. Cela n'est plus vrai, en b, pour un objet transparent dont chaque point n'éclaire qu'une petite partie de l'hologramme. Un petit morceau d'hologramme suffit à restituer l'image d'un objet diffusant, mais non d'un objet transparent.

Crédit :

2005 Encyclopædia Universalis France S.A.

*Tous les documents proposés par Encyclopædia Universalis  
sont légalement autorisés pour l'usage pédagogique*



### Enregistrement et restitution d'une image

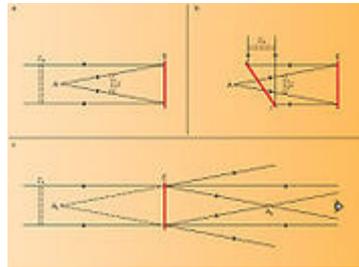
En a, le faisceau laser parallèle est divisé en deux par la lame semi-transparente I ; les objectifs de microscope Ob étalent la lumière de façon que l'objet et la plaque photographique soient complètement éclairés. En b, il suffit de remplacer la lame I par un miroir M pour obtenir une onde

de lecture 1 identique à l'onde de référence 0.

Crédit :

2005 Encyclopædia Universalis France S.A.

*Tous les documents proposés par Encyclopædia Universalis  
sont légalement autorisés pour l'usage pédagogique*



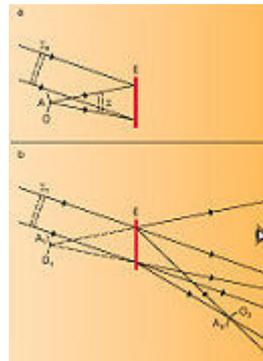
### Gabor : onde de référence

En a et b, deux façons d'enregistrer sur un support E l'hologramme d'un point A ; I est une lame semi-réfléchissante, 0 l'onde de référence et l'onde « objet ». En c, restitution des images virtuelle A1 et réelle A2 grâce à l'onde de lecture 1.

Crédit :

2005 Encyclopædia Universalis France S.A.

*Tous les documents proposés par Encyclopædia Universalis  
sont légalement autorisés pour l'usage pédagogique*



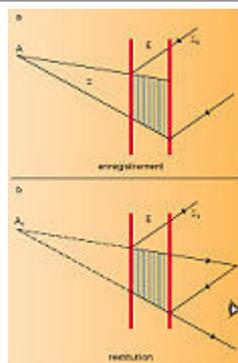
### Faisceau de référence oblique

Emploi d'un faisceau de référence oblique. En a, enregistrement de l'hologramme d'un point A de l'objet O ; en b, restitution des images virtuelle (A1,O1) et réelle (A2, O2). L'hologramme est désigné par E, les ondes « objet », de référence et de lecture par , 0 et 1 respectivement.

Crédit :

2005 Encyclopædia Universalis France S.A.

*Tous les documents proposés par Encyclopædia Universalis  
sont légalement autorisés pour l'usage pédagogique*



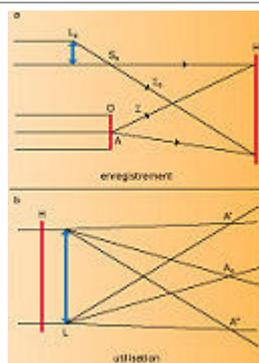
### Hologramme épais : enregistrement et restitution

Hologramme épais. En a, les ondes de référence 0 et « objet » sont envoyées de part et d'autre de l'hologramme ; elles créent ainsi des interférences dans toute l'épaisseur de l'émulsion. En b, les modifications ainsi introduites réfléchissent l'onde de lecture 1 et, en même temps, la chargent de l'information permettant de reconstituer l'image A1 de l'objet A.

Crédit :

2005 Encyclopædia Universalis France S.A.

*Tous les documents proposés par Encyclopædia Universalis sont légalement autorisés pour l'usage pédagogique*



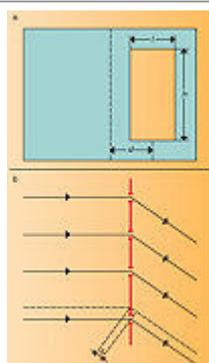
### Hologramme de Fourier

Hologramme de Fourier. En a, la lentille L0 fait converger en S0 une partie du faisceau laser. Le point S0 sert de source secondaire pour l'onde de référence 0. Le reste du faisceau éclaire l'objet O, dont chaque point tel que A émet une onde « objet ». E&hellip;

Crédit :

2005 Encyclopædia Universalis France S.A.

*Tous les documents proposés par Encyclopædia Universalis sont légalement autorisés pour l'usage pédagogique*



### Hologramme binaire

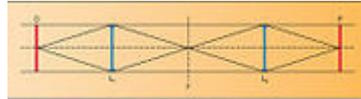
Réalisation d'un hologramme binaire. L'amplitude est codée à l'aide de l'aire

transparente (a). Le décalage  $d$  de l'ouverture crée une différence de marche  $\delta$  supplémentaire pour les ondes qui la traversent, ce qui permet de coder la phase de l'onde (b).

Crédit :

2005 Encyclopædia Universalis France S.A.

*Tous les documents proposés par Encyclopædia Universalis  
sont légalement autorisés pour l'usage pédagogique*



### Filtrage optique

Filtrage optique. Un faisceau laser parallèle éclaire l'objet O. Il est concentré en F par la lentille L1, puis rendu à nouveau parallèle par la lentille L2. Le couple de lentilles L1, L2 forme l'image de l'objet O dans le plan P.

Crédit :

2005 Encyclopædia Universalis France S.A.

*Tous les documents proposés par Encyclopædia Universalis  
sont légalement autorisés pour l'usage pédagogique*



### Dennis Gabor recevant le prix Nobel

Dennis Gabor (1900-1979), Hongrois émigré en Grande-Bretagne, a reçu le prix Nobel de physique, en 1971, pour l'invention de l'holographie.

Crédit :

Hulton Getty

*Tous les documents proposés par Encyclopædia Universalis  
sont légalement autorisés pour l'usage pédagogique*



### Dennis Gabor

Le physicien britannique d'origine hongroise Dennis Gabor (1900-1979), à gauche, reçoit des mains du roi de Suède Gustave VI Adolphe le prix Nobel de physique en 1971 pour l'invention de l'holographie.

Crédit :

Hulton Getty

Tous les documents proposés par Encyclopædia Universalis  
sont légalement autorisés pour l'usage pédagogique

---

## Prise de vue

Divers cas d'intervention de l'optique cohérente ont été considérés dans les articles interférences lumineuses et lumière - Diffraction, ainsi que dans l'article optique - Images optiques. Pour les sources usuelles, dites « thermiques », la phase change de façon aléatoire, à des intervalles de temps très rapprochés, ce qui limite la cohérence *temporelle* entre ondes lumineuses issues d'un même point à des instants successifs ; la cohérence *spatiale* entre ondes émises à un même instant par des points voisins est également limitée (cf. optique - Optique cohérente). La possibilité d'observer des interférences et les conditions de formation des images dépendent du degré de cohérence des lumières utilisées. La réalisation des lasers, très supérieurs pour cela aux sources antérieurement disponibles, a accru l'intérêt de l'optique cohérente.

Les récepteurs de lumière, notamment l'œil et les émulsions photographiques, ne sont directement sensibles qu'à l'intensité des ondes qu'ils reçoivent ; ils ne perçoivent ou n'enregistrent pas leur phase. La découverte de l'holographie a permis d'éviter une telle perte d'information. Cette technique fait intervenir une superposition d'ondes diffractées par les objets étudiés et d'« ondes de référence » qui servent à repérer la phase des premières ; les unes et les autres doivent être suffisamment intenses et cohérentes, ce à quoi les lasers se sont prêtés au mieux.

L'emploi des hologrammes, très simple en principe, nécessite une expérimentation parfois délicate. Il a donné lieu à d'importantes applications : observation d'images en relief et en couleurs, études interférentielles en temps plus ou moins différé, amélioration de photographies, reconnaissance de formes, etc. Il a contribué largement aux développements actuels de l'optique.

## Cohérence en optique

Sauf cas exceptionnels (émission stimulée des lasers, cf. lasers), la production de lumière par les atomes ou molécules se fait sous forme de trains d'ondes relativement brefs se succédant avec variation aléatoire de phase.

Ces sources permettent d'observer des interférences en utilisant des faisceaux issus d'un même point, divisés par exemple à l'aide d'une lame semi-transparente et semi-réfléchissante, ou encore grâce à une double réfraction, puis superposés après qu'ils ont parcouru des chemins différents.

Lorsque deux ondes monochromatiques, de même période, d'amplitudes  $S_1$  et  $S_2$  ( $S_1 \geq S_2$ ) et de phases  $\phi_1$  et  $\phi_2$ , vibrant suivant la même direction, parviennent en un même point, au même instant, leur addition se fait vectoriellement, l'amplitude résultante variant selon la valeur de  $\phi_1 - \phi_2$  : elle atteint  $S_1 + S_2$  là où il y a accord de phase, et tombe à  $S_1 - S_2$  là où il y a opposition de phase. Les phénomènes d'interférences qui en résultent sont stables tant que l'écart  $\phi_1 - \phi_2$  n'est pas modifié : la lumière est *cohérente* dans la mesure où cette condition est satisfaite.

Ces interférences ne se produisent que pendant les intervalles de temps où les trains d'ondes arrivent simultanément, ce qui suppose que la différence de marche entre eux ( $nd$ , où  $n$  est l'indice de réfraction du milieu et  $d$  la distance parcourue dans ce milieu) est inférieure à leur longueur  $L$ . Cette longueur et, par suite, la durée de passage  $\tau = L/c$  caractérisent donc la cohérence temporelle, dite aussi longitudinale, de la lumière utilisée (celle-ci est complètement incohérente dès que  $nd$  dépasse  $L$ ). Les interférences, lorsqu'elles existent, se succèdent à la même place et sont donc perceptibles. Une source n'est jamais réduite à un point, mais, si elle est assez petite, ses divers atomes ou molécules donnent encore lieu à des effets d'interférences, qui se superposent sans se brouiller. L'étendue au-delà de laquelle il n'en est plus ainsi limite sa cohérence spatiale, dite aussi transversale.

## Holographie : principe et réalisations

### Principe

Nous voyons un objet parce qu'il modifie, avant de la réémettre vers l'œil, la lumière qu'il reçoit. Cette modification porte, en général, sur les deux paramètres fondamentaux de l'onde lumineuse, son amplitude et sa phase. Plus précisément, les variations d'opacité d'un point à l'autre affectent l'amplitude de l'onde, tandis que les différences de position des divers points modifient la phase, en obligeant la lumière à effectuer des parcours plus ou moins longs.

Or, les récepteurs, capables d'enregistrer une image, ne sont sensibles qu'à l'intensité lumineuse, ce qui conserve les variations d'amplitude mais sacrifie celles de phase, et donc une partie de l'information qu'elles transportent. Le problème est alors de coder les modifications de phase sous forme de variations d'amplitude, de façon à pouvoir les enregistrer. La solution en est connue depuis longtemps et repose sur les propriétés des interférences lumineuses qu'on utilise pour enregistrer la totalité de l'information présente dans la lumière issue d'un objet.

La théorie de l'holographie est due à D. Gabor, en 1948, et lui valut le prix Nobel de physique en 1971. Toutefois, il fallut attendre 1962 pour que E. Leith et J. Upatnieks disposant d'une source de lumière cohérente assez intense, le laser, puissent obtenir le premier hologramme.



#### **Dennis Gabor recevant le prix Nobel**

Dennis Gabor (1900-1979), Hongrois émigré en Grande-Bretagne, a reçu le prix Nobel de physique, en 1971, pour l'invention de l'holographie.

Crédit :  
Hulton Getty

*Tous les documents proposés par Encyclopædia Universalis  
sont légalement autorisés pour l'usage pédagogique*

---



### Dennis Gabor

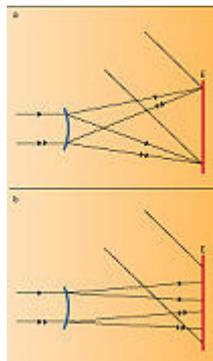
Le physicien britannique d'origine hongroise Dennis Gabor (1900-1979), à gauche, reçoit des mains du roi de Suède Gustave VI Adolphe le prix Nobel de physique en 1971 pour l'invention de l'holographie.

Crédit :  
Hulton Getty

*Tous les documents proposés par Encyclopædia Universalis  
sont légalement autorisés pour l'usage pédagogique*

Le principe qui sous-tend la réalisation de tout hologramme est le suivant : une surface sensible adéquate reçoit l'onde lumineuse provenant de l'objet, accompagnée d'une autre onde, cohérente avec la première, dite *onde de référence*. Ces deux ondes créent un système de franges d'interférences qu'enregistre le récepteur. Cet enregistrement constitue l'hologramme à proprement parler.

Pour restituer l'information ainsi mise en mémoire – on dit plutôt pour lire l'hologramme – il faut éclairer l'enregistrement par une nouvelle onde lumineuse, dite *onde de lecture*. L'hologramme se comporte alors comme un réseau de diffraction et transmet, ou réfléchit, plusieurs ondes correspondant aux divers ordres. L'une d'elles, correspondant à l'ordre zéro, ne porte aucune information. C'est la lumière directement transmise et elle est sans intérêt. Seules les autres ondes, associées aux ordres latéraux, portent l'information utile. Quand l'opération est convenablement conduite jusqu'à son terme, l'une de ces ondes est identique à celle qui provenait de l'objet lors de l'enregistrement, et l'œil qui la reçoit ne fait pas la différence. Un hologramme restitue donc le relief, au contraire d'une photographie conventionnelle, et son aspect (cf. photo) ne rappelle en rien celui de l'objet. De plus, chaque point de l'hologramme reçoit des informations venues de tous les points de l'objet, dans la mesure où celui-ci diffuse dans toutes les directions la lumière qu'il reçoit. Un fragment d'hologramme fournit donc la même image que l'enregistrement entier, à ceci près que la limitation de la région utilisée affecte la netteté des images restituées, comme cela se produit chaque fois que l'on restreint les dimensions latérales d'un faisceau lumineux.



### Hologramme : fonctionnement

En a, chaque point d'un objet diffusant envoie de la lumière en tous les points de l'hologramme E. Cela n'est plus vrai, en b, pour un objet

transparent dont chaque point n'éclaire qu'une petite partie de l'hologramme. Un petit morceau d'hologramme suffit à restituer l'image d'un objet diffusant, mais non d'un objet transparent.

Crédit :

2005 Encyclopædia Universalis France S.A.

*Tous les documents proposés par Encyclopædia Universalis  
sont légalement autorisés pour l'usage pédagogique*

---

## Réalisations

Pour que l'hologramme restitue, lors de sa lecture, une onde identique à celle qu'émettait l'objet lors de l'enregistrement, un certain nombre de conditions doivent être réalisées.

La lamination, produit de l'intensité lumineuse par la durée d'exposition, doit être choisie, et le traitement conduit de façon que la transparence en amplitude (rapport de l'amplitude transmise sur l'amplitude incidente) soit à peu près proportionnelle à l'énergie lumineuse reçue. Si cette condition, dite de linéarité, n'est pas respectée, l'hologramme diffracte des ondes parasites qui altèrent la qualité de l'image.

Le pas des franges d'interférences (espacement entre les franges) est en général très faible, de l'ordre de quelques micromètres. Il convient donc d'utiliser des récepteurs dont le pouvoir de résolution soit suffisant pour permettre d'enregistrer des détails aussi fins. Les émulsions photographiques utilisées, dites holographiques, ont une résolution d'au moins deux à trois mille traits au millimètre. En revanche, le problème ne se pose pas pour d'autres supports, comme la gélatine bichromatée ou les cristaux photosensibles, car les modifications se situent plus au niveau moléculaire qu'au niveau cristallin.

Pour la même raison, il importe que pendant toute la durée de l'enregistrement le déplacement relatif des faisceaux lumineux et du récepteur ne soit pas supérieur à une fraction de micromètre, sous peine de « brouiller » l'hologramme. Il faut donc prendre de grandes précautions pour limiter l'influence des déplacements et des déformations des supports, des turbulences de l'air, des dilatations thermiques, etc. Toutefois, l'emploi de lasers pulsés, dont l'éclair ne dure que quelques nanosecondes ( $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ ), permet l'enregistrement de portraits ou encore de mobiles très rapides, tels des projectiles ou des ondes de choc.

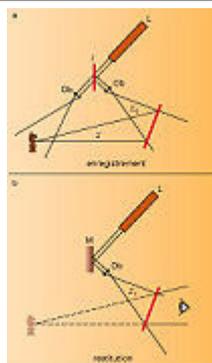
Pour les hologrammes le plus communément réalisés, dits hologrammes minces par transmission (cf. *infra*, Matériaux d'enregistrement), l'onde de lecture doit, en principe, être identique à l'onde de référence. Toutefois, l'observation visuelle n'exige pas que la cohérence de l'onde de lecture soit assurée sur l'ensemble de l'hologramme : l'œil, en effet, n'utilise que des faisceaux étroits, coniques, ayant pour sommets les points images et s'appuyant sur la pupille. Il est souvent possible, dans ces conditions, de remplacer le laser par une source de lumière moins onéreuse et plus accessible, comme une lampe à vapeur de sodium ou à vapeur de mercure.

D'autre part, des conditions opératoires convenables permettent de se libérer de la contrainte précédente – avec, cependant, une perte d'information – et autorisent même l'emploi de lumière blanche : on obtient alors un hologramme « arc-en-ciel ».

L'utilisation d'une source moins cohérente que le laser présente, en outre, l'avantage de réduire l'aspect particulier dû à la *granularité cohérente*. Cet aspect est facile à comprendre, sinon à calculer : chaque irrégularité de l'hologramme se comporte

comme une source de lumière émettant une onde sphérique. Ces ondes sont cohérentes et interfèrent dans l'espace au-delà de l'hologramme. Comme le déphasage entre ces ondes est aléatoire, leur état d'interférence est aussi aléatoire. Quand l'interférence est constructive, nous obtenons un maximum de lumière, et, dans le cas contraire, de l'obscurité. La probabilité d'une interférence constructive est assez faible, si bien que la granularité (*speckle*) est formée d'une multitude de points brillants se détachant sur un fond obscur.

L'onde issue de l'objet et l'onde de référence doivent être cohérentes, pour pouvoir interférer. Elles doivent donc être dérivées d'un même faisceau laser, grâce à un dispositif optique convenable. L'un des systèmes les plus simples est constitué d'une lame semi-réfléchissante suivie de deux objectifs de microscope : le rôle de ces derniers consiste à élargir les faisceaux lumineux, afin d'éclairer la totalité de l'objet. Toutefois, les contraintes expérimentales, ou plus simplement la commodité, conduisent souvent à des montages plus compliqués.



### Enregistrement et restitution d'une image

En a, le faisceau laser parallèle est divisé en deux par la lame semi-transparente I ; les objectifs de microscope Ob étalent la lumière de façon que l'objet et la plaque photographique soient complètement éclairés.

En b, il suffit de remplacer la lame I par un miroir M pour obtenir une onde de lecture 1 identique à l'onde de référence 0.

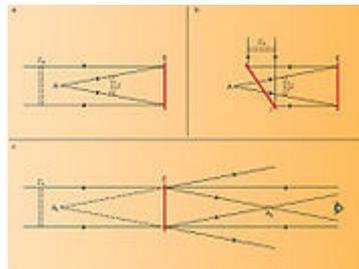
Crédit :

2005 Encyclopædia Universalis France S.A.

*Tous les documents proposés par Encyclopædia Universalis  
sont légalement autorisés pour l'usage pédagogique*

En fait, un seul impératif est à respecter vraiment : les distances parcourues par les divers faisceaux lumineux ne doivent pas différer de plus de la longueur de cohérence du laser utilisé (cf. *supra*). Certains lasers permettent d'atteindre plusieurs mètres et de réaliser ainsi des hologrammes d'une taille identique à celle des objets, tel celui de la Vénus de Milo – grandeur nature – réalisé en 1976 à l'université de Besançon.

Pour des raisons pratiques, Gabor avait utilisé une onde de référence ( $\Sigma_0$ ) sensiblement parallèle à l'onde issue de l'objet ( $\Sigma$ ). Mais, dans ce cas, lors de la lecture (onde  $\Sigma_1$ ), le faisceau directement transmis est confondu avec les faisceaux diffractés, ce qui gêne considérablement l'observation. Aussi Leith et Upatnieks ont-ils choisi d'incliner l'onde de référence par rapport à l'onde issue de l'objet ce qui, à la lecture, permet de séparer les faisceaux diffractés. Cette technique est couramment employée. Une autre solution, proposée par Y. Denisyuk, consiste à envoyer l'onde de référence au verso du récepteur et l'onde issue de l'objet au recto, mais cette pratique n'est pas utilisable dans tous les cas.



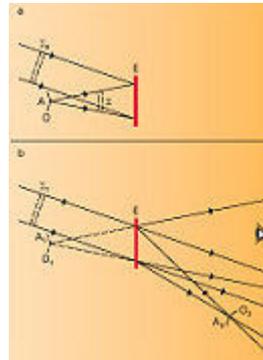
### Gabor : onde de référence

En a et b, deux façons d'enregistrer sur un support E l'hologramme d'un point A ; l est une lame semi-réfléchissante, 0 l'onde de référence et l'onde « objet ». En c, restitution des images virtuelle A1 et réelle A2 grâce à l'onde de lecture 1.

Crédit :

2005 Encyclopædia Universalis France S.A.

*Tous les documents proposés par Encyclopædia Universalis sont légalement autorisés pour l'usage pédagogique*



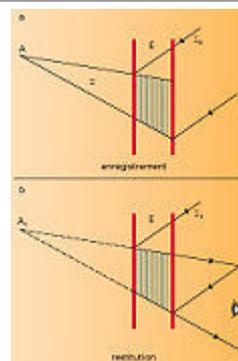
### Faisceau de référence oblique

Emploi d'un faisceau de référence oblique. En a, enregistrement de l'hologramme d'un point A de l'objet O ; en b, restitution des images virtuelle (A1, O1) et réelle (A2, O2). L'hologramme est désigné par E, les ondes « objet », de référence et de lecture par , 0 et 1 respectivement.

Crédit :

2005 Encyclopædia Universalis France S.A.

*Tous les documents proposés par Encyclopædia Universalis sont légalement autorisés pour l'usage pédagogique*



### Hologramme épais : enregistrement et restitution

Hologramme épais. En a, les ondes de référence 0 et « objet » sont envoyées de part et d'autre de l'hologramme ; elles créent ainsi des interférences dans toute l'épaisseur de l'émulsion. En b, les modifications ainsi introduites réfléchissent l'onde de lecture 1 et, en même temps, la

chargent de l'information permettant de reconstituer l'image A1 de l'objet A.

Crédit :

2005 Encyclopædia Universalis France S.A.

*Tous les documents proposés par Encyclopædia Universalis  
sont légalement autorisés pour l'usage pédagogique*

---

## Matériaux d'enregistrement

Divers types de supports peuvent être utilisés pour enregistrer des hologrammes, et le choix d'un matériau dépend de l'application envisagée. Parmi ceux-ci, les plus étudiés à l'heure actuelle sont les cristaux dits électro-optiques, dont l'indice de réfraction varie en raison de l'éclairement reçu. Citons, par exemple, le niobate de lithium ( $\text{LiNbO}_3$ ) ou le BSO ( $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ), oxyde mixte de bismuth et de silicium. Leur intérêt est multiple :— L'hologramme est utilisable dès qu'enregistré, alors qu'il faut à l'émulsion photographique un traitement chimique. Cette propriété autorise des opérations « en temps réel ».— Les modifications de structure sont réversibles (nous disons plutôt que le cristal est effaçable). Il peut donc être réutilisé, d'autant plus qu'il ne manifeste ni souvenir, ni fatigue, même après plusieurs milliers de cycles enregistrement-lecture-effacement.

Le support le plus ancien et le plus utilisé est l'émulsion photographique. Elle permet de réaliser des hologrammes permanents, mais exige un traitement assez long, de plusieurs dizaines de minutes.

La gélatine bichromatée et les photorésines fournissent directement des hologrammes de phase non effaçables. Elles ne sont sensibles que dans le bleu ou le proche ultraviolet, mais leur pouvoir de résolution est supérieur à celui de l'émulsion photographique.

Le film thermoplastique, où l'enregistrement est obtenu par déformation d'un polymère, présente l'avantage d'une courte durée de traitement, de l'ordre de quelques secondes, aussi équipe-t-il la plupart des « caméras holographiques » utilisées dans l'industrie.

Des hologrammes ont été obtenus à l'aide de micro-ondes hertziennes et même d'ondes acoustiques (ultrasonores), leur « lecture » étant assurée par des moyens optiques ou électriques. Ils peuvent servir à explorer certains milieux opaques en lumière visible et (ou) relativement étendus : corps humain, intérieur du sol, etc.

Lorsque la surface sensible est une émulsion photographique, le phénomène d'interférences est enregistré sous forme de variations de noircissement. On parle alors d'hologramme d'amplitude, parce qu'il modifie l'amplitude de l'onde de lecture mais laisse intacte sa phase. Ce type d'hologramme présente l'inconvénient d'être peu lumineux : la lumière diffractée utile, formant l'image, ne représente que 4 à 5 p. 100 de la lumière incidente.

Il est possible de remplacer les variations de noircissement par des variations d'épaisseur ou d'indice de réfraction, ce qui change la phase de l'onde de lecture sans altérer son amplitude. Pour cette raison, ces hologrammes sont dits de phase. Ils présentent l'avantage d'être beaucoup plus lumineux que les hologrammes d'amplitude, mais sont plus délicats à réaliser.

Pour enregistrer un hologramme de phase, on peut partir d'une émulsion argentique que l'on « blanchit » par un traitement chimique approprié, ce qui transforme l'argent

métallique en un sel d'argent soluble. Ce blanchiment s'accompagne d'une variation d'épaisseur de la gélatine, variation d'autant plus importante que l'argent métallique était plus abondant. Une autre solution consiste à remplacer l'émulsion argentique par un matériau photosensible transparent, comme la gélatine bichromatée ou un cristal photosensible. Dans le premier cas, les variations d'éclairement provoquent des modifications d'épaisseur, tandis que dans le second cas elles sont traduites par des changements d'indice de réfraction.

Que le support utilisé conduise à un hologramme d'amplitude ou à un hologramme de phase, son épaisseur peut avoisiner la longueur d'onde de la lumière, dans ce cas on parle d'hologramme mince, ou lui être très supérieure, et l'hologramme est dit épais. Dans un hologramme mince, l'information est sensiblement répartie sur un plan ; dans un hologramme épais, elle est présente dans toute l'épaisseur du matériau ; cela permet l'observation en lumière blanche ou la superposition de plusieurs hologrammes sur un même support (mémoires holographiques).

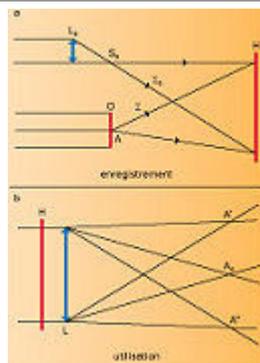
## Copies d'hologrammes

Il peut être intéressant de disposer de copies d'un hologramme. La réalisation directe, c'est-à-dire l'enregistrement du nombre voulu d'hologrammes à partir de l'objet, est longue, coûteuse, et le plus souvent irréalisable. On peut aussi enregistrer un hologramme à partir d'un autre hologramme : puisque l'onde restituée est identique à celle qui provient de l'objet. Mais ce procédé est également lourd à mettre en œuvre et il n'est pas envisageable pour une production en grande série.

La méthode actuellement utilisée est la suivante : on réalise un hologramme de phase dans lequel l'information est inscrite sous forme de variations d'épaisseur. Cet hologramme maître est métallisé par pulvérisation, puis on en tire une matrice. À partir de cette matrice, il est ensuite facile d'obtenir par pressage, selon un procédé très voisin de celui qui est utilisé pour la fabrication des disques, un nombre pratiquement illimité – jusqu'à plusieurs millions – de copies.

## Hologrammes de Fourier

On appelle hologrammes de Fourier (les autres étant dits « de Fresnel ») ceux qui sont obtenus, en lumière cohérente, lorsqu'un même plan, parallèle à l'émulsion, contient à la fois les divers points de l'objet et un point de concentration  $S_0$  du faisceau de référence. Les franges correspondant à un point A sont alors sensiblement rectilignes et parallèles, comme dans l'expérience des trous de Young, leur écartement étant inversement proportionnel à la distance  $S_0A$ .



**Hologramme de Fourier**

Hologramme de Fourier. En a, la lentille  $L_0$  fait converger en  $S_0$  une partie du faisceau laser. Le point  $S_0$  sert de source secondaire pour l'onde de

référence 0. Le reste du faisceau éclaire l'objet O, dont chaque point tel que A émet une onde « objet ». E&hellip;

Crédit :

2005 Encyclopædia Universalis France S.A.

*Tous les documents proposés par Encyclopædia Universalis  
sont légalement autorisés pour l'usage pédagogique*

---

En éclairant un tel hologramme en lumière parallèle, comme l'indique la figure b, on peut obtenir, dans le plan focal d'une lentille L, trois images  $A_0$ ,  $A'$  et  $A''$  de A, correspondant aux spectres d'ordre 0 et  $\pm 1$  du réseau. Ces hologrammes interviennent dans certains « filtrages » dont nous parlerons ci-après.

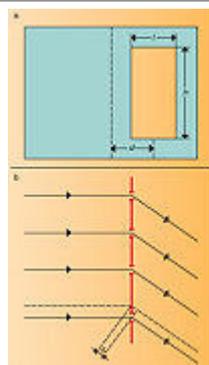
## Hologrammes synthétiques

En appliquant les lois de la diffraction (compte tenu des phases) au cas d'un objet géométriquement bien défini, il est possible de déterminer la répartition des éclairissements dans les franges qu'il formerait avec un faisceau de référence donné.

Un hologramme classique n'est qu'une figure d'interférences, plus ou moins compliquée, mais qui se ramène dans tous les cas à des variations de noircissement. Nous pouvons envisager de les créer directement de façon à réaliser un hologramme, sans disposer de l'objet correspondant. Un tel hologramme dit synthétique, ou réalisé par ordinateur, est obtenu comme suit : on se donne la position de chacun des points de l'objet et l'intensité de la lumière qu'il diffuse ; on calcule par ordinateur la répartition d'amplitude et de phase, dans le plan du support d'enregistrement, due à l'interférence de toutes les ondes de l'objet ; on dessine, à l'aide d'un traceur commandé par ordinateur, la répartition d'intensité, puis on la photographie ; enfin, le problème le plus délicat est celui du codage de la phase. Plusieurs solutions ont été adoptées ; nous en décrivons deux, à titre indicatif.

Le procédé le plus proche de la réalisation d'hologrammes réels consiste à ajouter à l'amplitude calculée comme précédemment l'amplitude d'une onde de référence, puis à calculer l'intensité correspondante. L'ordinateur doit calculer ces solutions point par point, c'est-à-dire les échantillonner. On peut montrer que la période d'échantillonnage doit être au plus de l'ordre de l'inverse de la bande de fréquences caractéristique de l'objet.

Un autre procédé fournit des hologrammes binaires, moins sensibles que les précédents aux erreurs de tracé. Les premières phases du calcul sont les mêmes : après un échantillonnage convenable de l'image à réaliser, on calcule l'amplitude et la phase de l'onde à enregistrer. Le plan de l'hologramme est divisé en autant de cases que l'on a choisi de points pour l'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 sont ainsi remplies, l'hologramme est photographié comme d'habitude (cf. photo).



### Hologramme binaire

Réalisation d'un hologramme binaire. L'amplitude est codée à l'aide de l'aire transparente (a). Le décalage  $d$  de l'ouverture crée une différence de marche  $\delta$  supplémentaire pour les ondes qui la traversent, ce qui permet de coder la phase de l'onde (b).

Crédit :

2005 Encyclopædia Universalis France S.A.

*Tous les documents proposés par Encyclopædia Universalis  
sont légalement autorisés pour l'usage pédagogique*

On conçoit facilement que les dimensions de l'ouverture puissent coder l'amplitude photographique : c'est le principe du diaphragme de l'œil ; le déplacement de l'ouverture code la phase en introduisant un déphasage supplémentaire pour les ondes qui l'ont traversée.

Nous avons signalé la possibilité de réaliser des hologrammes de phase. Cette technique peut être appliquée aux hologrammes synthétiques, qui prennent alors le nom de kinoforms. La première phase 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  $2k\pi$  près, de façon que toutes ses valeurs soient comprises entre 0 et  $2\pi$ . Cette information est alors enregistrée sous forme de variations d'épaisseur, comme pour tout hologramme de phase. Dans un kinoform, l'information portée par l'amplitude est perdue, ce qui peut être gênant ; en revanche, il est beaucoup plus lumineux qu'un hologramme d'amplitude.

## Applications de l'holographie

### Images holographiques

Les images holographiques constituent l'application la plus connue du grand public et même de beaucoup de chercheurs.

Un hologramme convenablement réalisé et éclairé ne diffracte en principe que trois ondes lumineuses : une onde directe, qui ne porte aucune information, et deux ondes « latérales », les seules utiles. L'une des ondes latérales est identique à celle qui provenait de l'objet et forme une image dite virtuelle car placée derrière l'hologramme, pour l'observateur. L'autre onde forme une seconde image, placée en avant de l'hologramme et dite réelle. Pour des raisons diverses, il est très difficile de voir simultanément ces deux images, mais un choix convenable de l'onde de lecture permet d'observer tantôt l'une, tantôt l'autre, l'image réelle fournissant bien entendu des effets beaucoup plus spectaculaires que l'image virtuelle.

En 1969, S. Benton imagine une méthode autorisant la restitution en lumière blanche, permettant ainsi de réaliser des hologrammes « arc-en-ciel ». Cette méthode, gagnant en commodité d'observation, entraîne la suppression de la parallaxe horizontale, ce qui, dans la majorité des cas, n'est pas très gênant.

La première étape de la fabrication d'un hologramme arc-en-ciel est l'enregistrement par un procédé conventionnel d'un hologramme maître ( $H_0$ ). Celui-ci est ensuite masqué par un écran ne laissant libre qu'une fente horizontale, et éclairé de façon à former une image réelle. L'onde lumineuse issue de  $H_0$ , ainsi modifiée, est combinée à une nouvelle onde de référence pour donner l'hologramme définitif ( $H_1$ ), lequel enregistre donc l'information « objet », mais aussi l'information « fente ». La restitution à partir de  $H_1$  donne alors une image de l'objet plus une image de la fente, par laquelle passe toute la lumière. C'est bien entendu là où l'observateur doit placer ses yeux. Si l'hologramme est éclairé en lumière blanche, chaque radiation crée sa propre image de la fente, superposée aux autres. L'hologramme change de couleur suivant la position des yeux devant la fente, d'où son nom.

Nous pouvons interpréter ce résultat en admettant que la lumière transmise par la fente, d'une part, l'onde de référence, d'autre part, interfèrent et forment dans le plan de l'hologramme définitif un réseau de diffraction horizontal. Ce réseau remplace les franges qui auraient créé la parallaxe verticale, et c'est lui qui disperse la lumière diffractée par l'hologramme définitif.

Les hologrammes animés sont obtenus comme suit : la scène à reproduire est filmée à l'aide d'une caméra conventionnelle, puis un hologramme de chaque image est enregistré sur une bande verticale étroite de film ; ces bandes sont ensuite juxtaposées – comme les planches d'une palissade – en respectant l'ordre logique d'apparition et de façon que chacun des yeux de l'observateur ne voie qu'une image restituée. La sensation de relief est obtenue par stéréoscopie, les deux yeux voyant des images légèrement différentes. L'impression de mouvement résulte du déplacement relatif de l'observateur et de l'hologramme, ce mouvement assure la succession des images. La parallaxe verticale est alors supprimée, ce qui permet, dans la plupart des cas, d'utiliser la technique arc-en-ciel. Il ne s'agit pas là d'images holographiques au sens strict du terme ; en fait, l'holographie ici ne sert qu'à stocker les images et à permettre leur observation sous une forme plus commode.

Signalons enfin que si, la transmission d'images holographiques par la télévision ne présente pas d'impossibilités techniques, elle nécessite une telle largeur de bande – environ cent mille fois plus que pour une image « classique » – que sa réalisation ne pourra aboutir avant quelques années. Le cinéma holographique, malgré les difficultés soulevées par la prise de vue de grands objets et par la projection devant un public nombreux, est également à l'étude. Le succès auprès du grand public des diverses formes de cinéma en relief est prometteur pour l'élargissement de cette nouvelle technique. Le Futuroscope de Poitiers présente un système de cinéma en relief par stéréoscopie qui donne une vision d'excellente qualité et physiologiquement acceptable avec le port de lunettes à verres polarisants.

## Composants optiques

Pour divers tests, par exemple de qualité optique, il est nécessaire de disposer d'une onde de référence, grâce à laquelle on mesure par interférométrie les défauts du composant étudié : miroir, objectif, etc. Classiquement, cette onde est obtenue à partir d'un composant optique, lequel est très difficile à réaliser en raison de la précision requise. Un hologramme synthétique permet de résoudre beaucoup plus simplement le problème. Une application particulière des kinoforms est constituée par

les miroirs « tête haute », qui permettent à un pilote d'avion de voir simultanément le paysage à l'extérieur de l'avion et les indications des instruments de bord.

## Interférométrie

Parmi les applications (cf. pl. couleurs, verso) les plus importantes de l'holographie figure l'interférométrie. En interférométrie classique, les deux ondes qui interfèrent doivent être présentes en même temps. Nous allons voir que cette condition est superflue en interférométrie holographique.

Nous savons que l'onde issue de l'hologramme d'un objet est identique, en amplitude et en phase, à l'onde émise par l'objet. Par suite, les ondes formées à partir d'un faisceau de lumière cohérente par un objet A et l'hologramme d'un objet B peuvent interférer aussi bien que celles qui sont formées à partir de l'objet A et de l'objet B lui-même, et fournir le même résultat. En particulier, l'objet B peut être l'objet A tel qu'il existait un moment plus tôt, par exemple avant un déplacement, ou une déformation. L'étude des contraintes par photoélasticité est ainsi très facilitée, d'autant plus qu'elle peut se faire en profondeur, par plans successifs. Il en est de même de l'étude de certaines vibrations.

Une variante intéressante est l'interférométrie « en temps réel », obéissant au schéma suivant : un hologramme de l'objet non déformé est enregistré, puis remis en place après traitement, les positions relatives de la source, de l'objet et de l'hologramme n'étant pas modifiées. L'objet se superpose alors exactement à son image holographique. Tout déplacement, toute déformation se traduisent par des franges d'interférences, dont il est possible de suivre et/ou d'enregistrer l'évolution au cours du temps. Cette possibilité est précieuse pour des études dynamiques comme la déformation de pneus ou de lames de turbines. Cette méthode, comme l'hologinématographie, peut être combinée avec un éclairage stroboscopique, grâce auquel un objet en vibration périodique apparaît immobile, ou encore en mouvement ralenti.

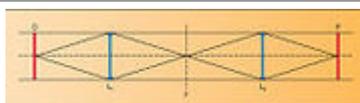
Un autre procédé consiste à enregistrer un hologramme de l'objet non déformé, puis, avant traitement, un second hologramme du même objet, déformé cette fois. L'hologramme double est ensuite traité, puis examiné normalement. Là encore, et pour les mêmes raisons que précédemment, des franges d'interférences matérialisent les déformations de l'objet. L'avantage de ce procédé est d'éviter toute manipulation du support d'enregistrement et, par suite, tout risque de faire apparaître des franges parasites, ou même de brouiller l'enregistrement.

Aux émulsions photographiques, on préfère de plus en plus d'autres matériaux, comme les cristaux photosensibles ou les films thermoplastiques, en raison de leur commodité de traitement. Ils permettent d'utiliser l'interférométrie holographique à l'atelier ou à l'usine, dans des conditions plus sévères que celles qui règnent habituellement au laboratoire. Plusieurs fabricants proposent déjà une gamme assez variée de réalisations industrielles, utilisables sans précautions particulières.

## Traitement optique de l'information

Un premier aspect du traitement optique de l'information est exposé dans le chapitre 3 de l'article lumière – Diffraction. Soit à exploiter un document, un cliché photographique O, par exemple ; éclairons-le en lumière cohérente et recevons la lumière (directe et diffractée) sur une lentille  $L_1$ . Dans la région conjuguée de la source par rapport à  $L_1$  (plan focal de celle-ci, si la source est à l'infini), il se forme un « spectre de diffraction de Fourier » F, déterminé par la répartition des fréquences

spatiales de l'objet  $O$ . Si l'on n'agit pas sur ce spectre, et si, au-delà de lui, un second objectif  $L_2$  forme dans le plan  $P$  l'image de  $O$ , celle-ci est reconstituée, à peu près semblable à l'objet. Mais on peut la transformer en agissant convenablement sur les divers éléments du spectre de Fourier. En y plaçant un petit écran qui absorbe ou réduit la lumière voisine de l'axe (filtre d'amplitude, passe-haut pour les fréquences spatiales), on transmet surtout les ondes diffractées par les petits détails. Grâce à ce filtrage (qui est étudié dans l'article précité), l'image formée en  $P$  est parfois plus nette que  $O$ .



### Filtrage optique

Filtrage optique. Un faisceau laser parallèle éclaire l'objet  $O$ . Il est concentré en  $F$  par la lentille  $L_1$ , puis rendu à nouveau parallèle par la lentille  $L_2$ . Le couple de lentilles  $L_1$ ,  $L_2$  forme l'image de l'objet  $O$  dans le plan  $P$ .

Crédit :

2005 Encyclopædia Universalis France S.A.

*Tous les documents proposés par Encyclopædia Universalis  
sont légalement autorisés pour l'usage pédagogique*

On peut, plus généralement, la débarrasser de constituants superflus en n'y conservant, s'ils existent, que ceux qui reproduisent un objet déterminé  $O'$  : on place, à cet effet, en  $F$ , un hologramme de Fourier de  $O'$  adéquat. On peut même, grâce à un faisceau de restitution convenable, faire converger en un point la lumière transmise vers  $P$  ; l'existence de ce point et sa position sur  $P$  permettent alors de reconnaître l'existence et la place, dans l'objet  $O$ , d'un objet semblable à  $O'$ . La méthode se prête à la recherche d'une lettre ou d'un mot dans un texte étendu, à l'identification d'une portion de paysage dans la réponse d'un radar, à la comparaison d'une empreinte digitale et de celles qui sont enregistrées dans un fichier, etc. On peut aller jusqu'à apprécier un « degré de ressemblance » entre des objets qui diffèrent plus ou moins.

L'holographie permet d'une façon analogue d'assurer le secret d'une transmission par codage et décodage d'un document.

Les mémoires holographiques permettront d'augmenter la capacité de stockage des ordinateurs tout en conservant une grande rapidité de lecture : un centimètre carré d'émulsion pourrait, compte tenu de l'épaisseur, emmagasiner cent millions d'informations élémentaires (*bits*).

#### Les articles liés

- INTERFÉRENCES LUMINEUSES
- LASERS
- OPTIQUE - Optique cohérente

#### Bibliographie

A. M. Christakis, « Techniques : le musée de l'holographie », in *Universalis 1986*, Encyclopaedia Universalis, Paris

A. Cozannet, J. Fleuret, H. Maître & M. Rousseau, *Optique et télécommunications*,

*transmission et traitement optiques de l'information*, Eyrolles, Paris, 2<sup>e</sup> éd. 1983

M. Françon, *Holographie*, Masson, Paris, 2<sup>e</sup> éd. 1987

P. Hariharan, *Optical Holography*, Cambridge Univ. Press, Londres, 1984

W. P. Juptner, *Holography Techniques and Applications*, International Society for Optical Engineering, Bellingham (Wash.), 1989

G. Saxby, *Hologrammes*, Masson, 1984

W. S. Schumann & M. Dubas, *Holographic Interferometry*, Springer-Verlag, Berlin, 1978

L. M. Soroko, *Holography and Coherent Optics*, Plenum Press, New York, 1980

P. Smigielski, H. Fagot & F. Albe, « Cinéma en relief : les promesses de l'holographie », in *La Recherche* n<sup>o</sup> 163, février 1985.

---