

punaises des lits que nous avons échantillonnées sur le territoire des États-Unis. Notre équipe et d'autres ne font que commencer à identifier les mécanismes de cette résistance. Deux de mes collègues de l'Université du Kentucky, Fang Zhu et Subba Reddy Palli, ont utilisé des techniques de génie génétique pour rétablir la sensibilité aux insecticides de punaises résistantes. Selon leurs travaux, des enzymes présentes dans les souches résistantes, et qui agissent pour détoxifier les insecticides, pourraient être l'objet d'interventions ciblées.

De même, mon équipe a découvert qu'un composé connu pour accroître la toxicité des insecticides en prenant pour cible ce complexe d'enzymes rendait plus sensible à la deltaméthrine notre population de punaises hyperrésistantes. L'industrie de lutte contre les nuisibles utilise déjà des formes commerciales du composé qu'est le butoxyde de pipéronyle pour rétablir un certain niveau de sensibilité aux pyréthrinoides chez les punaises. Les chercheurs pourraient être bientôt en mesure

d'identifier le mode de résistance de tout type de punaises pour ensuite adopter une stratégie d'éradication adéquate, en sélectionnant des insecticides et autres substances qui fonctionneraient sur ce groupe particulier de nuisibles.

## Faire appel au bon sens

La punaise des lits est un véritable cauchemar, en particulier pour ceux qui n'ont pas les moyens financiers de recourir à des contre-mesures efficaces. Les professionnels de la lutte contre les parasites peuvent venir à bout d'une infestation en effectuant des inspections approfondies et méthodiques des lieux, en utilisant avec compétence les insecticides à leur disposition et en employant toute une panoplie d'autres stratégies. Cela nécessite une main-d'œuvre importante et a un coût.

En fin de compte, le mieux est encore de faire appel à son bon sens pour éviter d'introduire des punaises des lits chez soi. En ce qui me concerne, lorsque je reviens d'un appartement infesté, je mets mes vête-

ments dans le séchoir électrique et le règle sur la chaleur maximale. Au retour de voyage, plutôt que de prendre le risque d'une invasion à la maison, je préfère laisser ma valise tout un week-end dans ma voiture garée sous un soleil de plomb : l'exposition prolongée d'un bagage à une température de 50 °C permet d'occire définitivement les éventuelles punaises qui s'y seraient glissées. En venir à bout par le gel à l'intérieur d'un véhicule est difficilement envisageable, car les punaises peuvent survivre de nombreuses heures aux températures atteintes par un congélateur domestique.

Il est peu probable que les punaises des lits recouvrent leur récent statut de nuisibles oubliés. Mais en faisant de la prévention auprès du public, tout en explorant les points de vulnérabilité particuliers de l'insecte en question, les scientifiques peuvent marquer des points. Considérer la punaise des lits comme un problème de santé publique et non comme un stigmata social est une étape que la société peut aujourd'hui franchir. ■

Entrée gratuite

**Au Jardin des Plantes**

Détails sur [www.jardindesplantes.net](http://www.jardindesplantes.net) dans "l'agenda du jardin"

**UNE EXPO / DES DÉBATS**

**Lundi 2 avril - 18h**  
**Contes, légendes et histoires : les araignées, entre art et mythes**  
*A. Gaborit*, responsable de la collection Afrique au musée du quai Branly et du Pavillon des Sessions au musée du Louvre (sous réserve), *D. Noly*, conteuse et musicienne.

**CONFÉRENCES**

Cycle : "Rio + 20"  
**Lundi 16 avril - 18h**  
**L'évaluation économique des services liés à la biodiversité : enjeux, méthodes, résultats**  
*B. Chevassus-au-Louis*, inspecteur général de l'agriculture, ancien directeur de l'INRA, ancien président du Muséum.

**Lundi 23 avril - 18h**  
**Le "coût de l'inaction politique" : l'évaluation économique peut-elle influencer nos décisions ?**  
*Y. Laurans*, chercheur associé, Institut du Développement durable et des Relations internationales (IDDRI), Fondation SciencesPo.

**Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution**  
36 rue Geoffroy Saint-Hilaire, Paris 5<sup>e</sup> - Métro : Jussieu

**COURS PUBLICS**

Cycle : "Le processus de l'évolution biologique"  
*M. Veuille*, directeur d'étude à l'EPHE, UMR Origine, structure et évolution de la biodiversité, Muséum/CNRS

**Jeudi 5 avril - 18h** : La sélection naturelle, de Darwin à la génomique évolutive  
**Jeudi 12 avril - 18h** : Écologie moléculaire : comment s'écrit la biographie des espèces

**Grand Amphithéâtre du Muséum**  
57 rue Cuvier, Paris 5<sup>e</sup> - Métro : Jussieu

# L'épopée de L'HOLOGRAPHIE

Sean F. Johnston

**Autrefois emblématique du futurisme, l'holographie n'exerce plus la même fascination aujourd'hui. Pourtant, elle a envahi notre vie quotidienne et suscite des recherches actives.**

Il y a une trentaine d'années, les expositions d'hologrammes attiraient des centaines de milliers de visiteurs dans les grandes villes du monde entier. Le public découvrait avec émerveillement des images tridimensionnelles au réalisme étonnant. On célébrait l'holographie – et on la célèbre toujours – au travers de la science-fiction. Les entrepreneurs lui prédisaient des applications dans les domaines de l'art, de la photographie et de la télévision.

Aujourd'hui, l'holographie s'est muée en une technique fertile, occupant une place importante dans la science moderne et dans notre quotidien : elle est par exemple utilisée dans les icônes de cartes de crédit. Mais en se généralisant, elle a perdu une partie de son pouvoir de séduction. Autrefois emblème du futurisme, elle peut sembler dépassée à l'heure de la télévision en trois dimensions – bien que celle-ci n'offre pas une aussi bonne possibilité de voir l'image sous différents points de vue. En outre, d'autres techniques de création d'images en relief lui sont rattachées à tort, ce qui entretient une certaine confusion sur sa nature et ses possibilités exactes. Nous verrons que toutes ces techniques sont fondées sur des principes distincts.

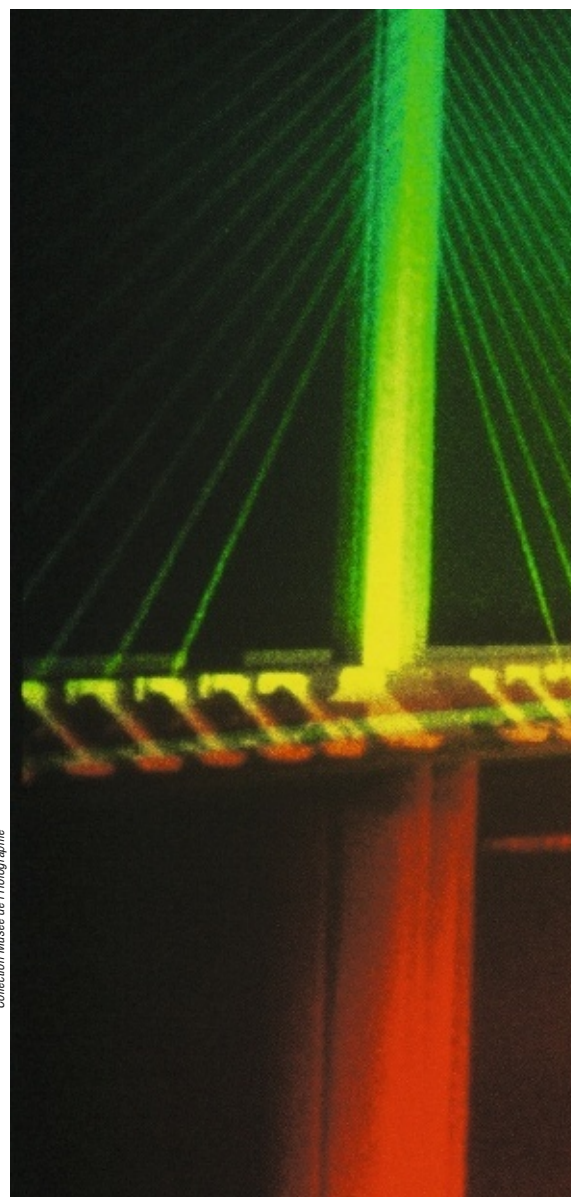
L'histoire de l'holographie, au croisement de disciplines aussi différentes que l'art et l'électronique, illustre l'une des plus grandes réussites scientifiques et techni-

ques des deux dernières générations. Elle met aussi en évidence les déceptions liées à une vision trop optimiste du progrès. Enfin, elle renseigne sur les facteurs culturels qui influent sur les avancées scientifiques et le changement technologique. Entrons donc dans cette histoire.

## L'optique revisitée

À la fin de la Seconde Guerre mondiale, l'optique est devenue un domaine de l'ingénierie sophistiqué, mais routinier. L'optique géométrique, utilisée pour la conception de nombreux dispositifs, est au cœur d'industries importantes, qui ont profité des demandes liées à la guerre (jumelles, viseurs de fusils, périscopes...). Cependant, assez peu de physiciens sont attirés par ce domaine, car il met trop l'accent sur la science appliquée. Son homologue plus « noble », l'optique physique (qui s'intéresse aux phénomènes ondulatoires, tels que les interférences et la diffraction), est devenu un sujet de recherche majeur à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, mais il s'est essoufflé par la suite et n'a débouché que sur quelques applications pratiques.

Au moins deux de ces dernières partagent certaines caractéristiques techniques avec l'holographie – bien que ses découvreurs ne s'en soient pas directement inspirés. La première exploite un concept



Collection Musée de l'Holographie



ingénieurs de photographie en couleur inventé par le physicien français d'origine luxembourgeoise Gabriel Lippmann dans les années 1890, et qui lui a valu le prix Nobel en 1908. Sa technique utilise une émulsion photographique déposée sur une surface réfléchissante pour enregistrer les différentes composantes fréquentielles – et donc les différentes couleurs – de la lumière. Celles-ci forment des ondes dites stationnaires au sein de l'émulsion : les ondes lumineuses incidentes et réfléchies se combinent pour faire vibrer sur place le champ électromagnétique, ce qui produit des maximaux d'intensité à des profondeurs fixes. Des motifs se dessinent alors dans l'émulsion à des profondeurs qui dépendent de la longueur d'onde, c'est-à-dire de la couleur (voir la figure 2). Lorsque la plaque photographique est développée et éclairée par de la lumière blanche, ces motifs sombres réfléchissent et renforcent sélectivement la composante fréquentielle à laquelle ils sont associés ; au final, la couleur de l'image est restituée.

La seconde application partageant certaines caractéristiques avec l'holographie est la microscopie à contraste de phase, qui permet d'observer des échantillons transparents, et qui a valu à son créateur, le physicien néerlandais Frederik Zernike, le prix Nobel en 1953. Elle est fondée sur le ralentissement des ondes lumineuses qui traversent l'échantillon avant d'atteindre le microscope ; un décalage de phase en résulte, modifiant la position du pic de l'onde. En comparant le faisceau de lumière transmise à un faisceau de référence – plus précisément, en les faisant interférer –, on reconstitue les caractéristiques de l'échantillon.

Aucune de ces techniques n'a beaucoup fait parler d'elle. Celle de Lippmann est assez lente et minutieuse à utiliser, pour des résultats frustrants (le contraste de l'image est mauvais si l'éclairage n'est pas réglé de façon très précise). Celle de Zernike reste un outil de spécialistes, surtout mis en œuvre par les biologistes et les géologues. Ni l'une ni l'autre ne semblent exploitables à grande

échelle. Dans son discours de réception du prix Nobel, Zernike a écrit :

« Rétrospectivement, je suis impressionné par les grandes limitations de l'esprit humain. Comme nous sommes rapides pour apprendre, c'est-à-dire imiter ce que d'autres ont fait ou pensé avant nous ! Et comme nous sommes lents pour comprendre, c'est-à-dire voir les connexions plus profondes ! Mais là où nous sommes les plus lents, c'est pour inventer de nouvelles connexions, ou même appliquer de vieilles idées à un domaine nouveau. »

Comme ces deux techniques, l'holographie est fondée sur la manipulation des ondes et des interférences. Trois dispositifs précurseurs ont été élaborés de façon indépendante. Le premier est conçu

**1. L'HOLOGRAMME DU PONT DE TAMPA,** en Floride, est enregistré sur une plaque de 1 mètre sur 1,50 mètre, et a une profondeur apparente de 8 mètres. La réalisation de telles œuvres, destinées notamment à des expositions, a été permise par une vague d'innovations dans les années 1970.

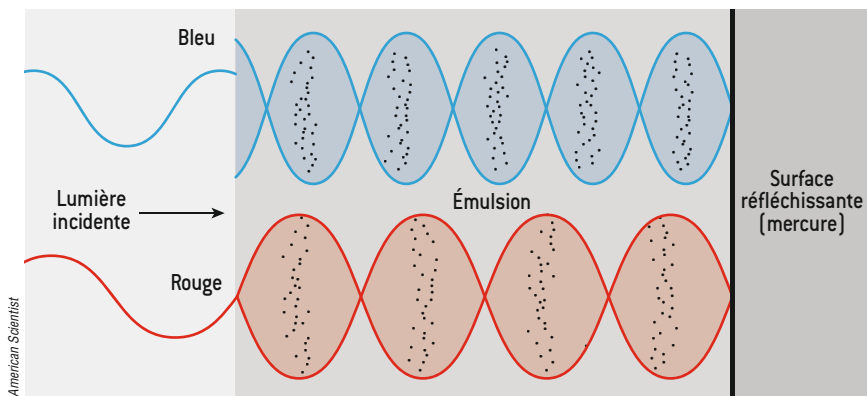
## L'ESSENTIEL

✓ Un hologramme est un motif dessiné par les interférences de la lumière diffusée par un objet avec un rayon lumineux de référence. Le motif est enregistré sur une plaque. Quand on la regarde, on voit l'objet en relief.

✓ L'holographie a inspiré de nombreux artistes et suscité des attentes parfois irréalistes.

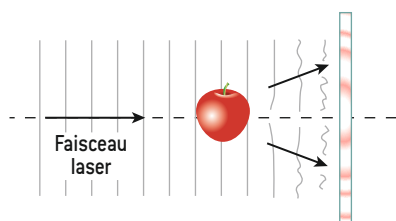
✓ Elle a aussi donné naissance à de nombreux dispositifs pratiques, tels les hologrammes de sécurité qui équipent les cartes bancaires.

✓ Les recherches en cours visent notamment à fabriquer des mémoires holographiques.

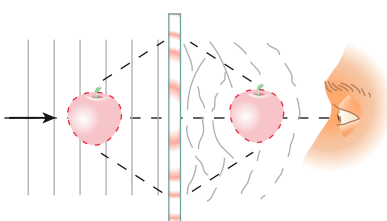


**2. UN DES PREMIERS DISPOSITIFS DE PHOTOGRAPHIE EN COULEUR**, inventé par Gabriel Lippmann, est fondé sur des interférences : la lumière de chaque couleur passe par une lentille, traverse l'émulsion photographique et se réfléchit sur une surface de mercure ; les interférences des ondes incidente et réfléchiée créent une onde stationnaire (le champ vibre sur place entre les positions extrêmes représentées ci-dessus). Cette onde a des pics d'intensité à des profondeurs fixes, où l'émulsion s'assombrit (*amas de points*). Quand la plaque développée est éclairée avec de la lumière blanche, les zones assombries renforcent la longueur d'onde originale, ce qui restitue la couleur.

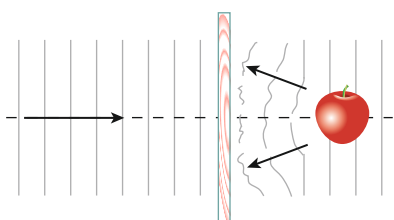
Enregistrement d'un hologramme de Gabor



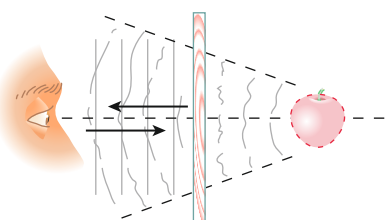
Reconstruction d'un hologramme de Gabor



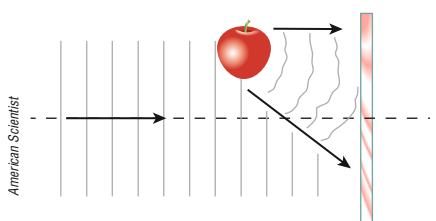
Enregistrement d'un hologramme de Denissiouk



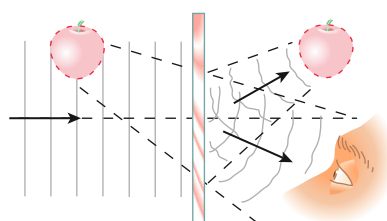
Reconstruction d'un hologramme de Denissiouk



Enregistrement d'un hologramme de Leith-Upatnieks



Reconstruction d'un hologramme de Leith-Upatnieks



**3. L'ENREGISTREMENT D'HOLOGRAMMES** (à gauche) et leur visualisation (à droite) utilisent trois méthodes différentes. La lumière laser arrive par la gauche (les lignes verticales grises représentent les fronts d'onde, et la flèche la direction de propagation) et rencontre un objet qui diffuse la lumière (ici une pomme). La lumière diffusée se combine à l'onde incidente pour produire un motif d'interférences (franges rouges) sur une plaque photographique. Dans le dispositif de Denissiouk (au centre), l'objet est situé derrière la plaque, tandis qu'il est devant dans ceux de Gabor et de Leith et Upatnieks (respectivement en haut et en bas). Dans ce dernier dispositif, l'objet est décalé par rapport à l'axe central du faisceau incident. Une fois développés et éclairés de façon appropriée, les hologrammes réfléchissent (Denissiouk) ou transmettent (Gabor et Leith et Upatnieks) la lumière, ce qui reconstruit l'image de l'objet. L'hologramme de Gabor produit deux images superposées, celui de Denissiouk une seule image et celui de Leith et Upatnieks une image soit devant, soit derrière la plaque, selon l'angle sous lequel on la regarde.

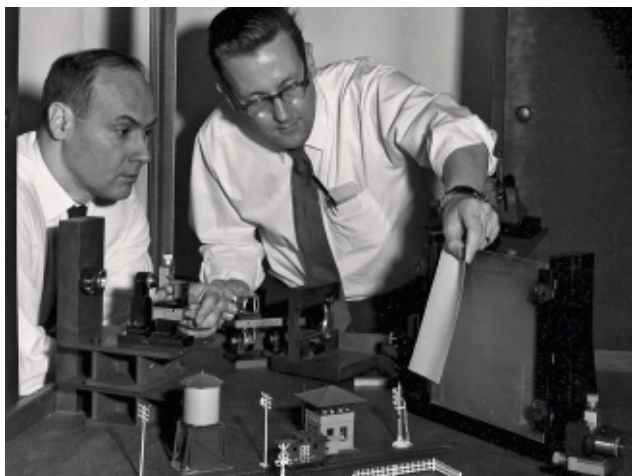
en 1948 par Dennis Gabor, un physicien d'origine hongroise qui travaille pour une firme anglaise d'électrotechnique. Son dispositif sert à améliorer la qualité d'image de la première génération de microscopes électroniques et procède en deux étapes (voir la figure 3). La première est l'enregistrement : on projette un faisceau électronique sur l'échantillon à observer, qui le diffuse – on dit aussi qu'il le diffracte (on peut se représenter les électrons comme des ondes, tout comme la lumière visible). Le faisceau diffusé interfère avec le faisceau non dévié pour produire un motif sur une pellicule photographique. Gabor nomme ce motif hologramme, mot construit à partir de racines grecques signifiant « dessin entier ». La seconde étape est le visionnage : l'hologramme est introduit dans une sorte de système de projection, qui recrée une image de l'échantillon observable à travers un oculaire.

## Des failles pratiques et fondamentales

L'idée est astucieuse, mais les articles de Gabor sont presque incompréhensibles pour ses contemporains, même pour des lauréats du prix Nobel tels que sir Lawrence Bragg et Max Born. Un petit groupe de recherche industrielle qui s'efforce de l'exploiter finit par considérer, vers le milieu des années 1950, que c'est une piste coûteuse et peu rentable. Les chercheurs de ce groupe, ainsi qu'une poignée d'autres, découvrent des failles pratiques et fondamentales. Les hologrammes de Gabor nécessitent un faisceau électronique monochromatique, mais créer une source d'électrons d'énergie constante qui serait stable pendant l'exposition (plusieurs minutes) se révèle impossible. Les chercheurs ne parviennent pas à reconstruire une image reconnaissable à partir des hologrammes résultants. Et le dispositif crée deux images, l'une semblant située en avant et l'autre en arrière de la plaque, qui se superposent et donnent un résultat confus. Au cours de la décennie suivante, Gabor, devenu enseignant-chercheur en électronique à l'Imperial College de Londres grâce à son invention, s'en détourne pour travailler dans les domaines plus fertiles de l'ingénierie télévisuelle et de la modélisation de la fusion nucléaire.

Le deuxième concept novateur apparaît vers la fin des années 1950 à Léningrad (aujourd'hui Saint-Petersbourg), où un doctorant, Iouri Denissiouk, cherche à





© Juris Upatnieks

**4. EMMETT LEITH ET JURIS UPATNIEKS (à gauche)** ont créé l'une des principales techniques de réalisation d'hologrammes. Leur hologramme d'un train miniature (à droite), produit en 1965, était l'un des premiers de ce type à être vus par un large public. L'image était rouge en raison



© Juris Upatnieks

du type de laser utilisé. Les plaques sur lesquelles les hologrammes sont enregistrés, d'abord minuscules, passent à une trentaine de centimètres de longueur et de largeur dans les années 1960, et montrent des objets de plusieurs mètres de profondeur.

enregistrer et à reproduire les caractéristiques complètes d'un champ d'ondes lumineuses. Il souhaite capturer un front d'onde (une surface d'égale phase) en un point arbitraire de l'espace, comme le fait l'œil humain, afin de visualiser une scène tridimensionnelle en couleur. Denissiouk finit par reprendre et généraliser certains aspects de la photographie de Lippmann. Il crée des ondes stationnaires dans une émulsion photographique en faisant interférer la lumière incidente avec celle qui est réfléchie par l'objet (voir la figure 3). Il enregistre ainsi le front d'onde lumineux, sous forme d'un motif d'interférences, en utilisant de la lumière monochromatique. Le motif enregistré peut ensuite réfléchir la lumière pour recréer le front d'onde.

Le dispositif de Denissiouk a l'avantage d'éviter les images superposées de Gabor, mais il est confronté à des problèmes pratiques similaires. Il a besoin de lumière cohérente, c'est-à-dire dont la phase est assez régulière pendant le temps d'exposition pour que des interférences se produisent. Or les sources disponibles sont peu lumineuses et insuffisamment cohérentes. En conséquence, il ne parvient à enregistrer que des images d'objets faisant moins d'un millimètre d'épaisseur. En outre, il pense-à tort- que ces objets doivent être très réfléchissants. Il n'enregistre donc que des images de miroirs très minces-qui réfléchissent la lumière de la même façon que l'original, de sorte qu'un homme qui regarde l'image voit non seulement le miroir, mais aussi sa propre figure reflétée-ou d'objets de ce type. Ses contemporains rejetant à la fois sa théorie et ses résultats,

Denissiouk se tourne vers d'autres travaux au début des années 1960.

La troisième idée novatrice est encore moins liée à l'optique classique. Dans les années 1950, aux Laboratoires Willow Run (dédiés aux contrats militaires) de l'Université du Michigan, le jeune ingénieur électricien Emmett Leith travaille à la conception de nouveaux radars. Leith cherche des méthodes pour traiter les données de ce qu'on nommera plus tard le radar à visée latérale ou à synthèse d'ouverture. Ce radar émet des ondes électromagnétiques et capte leurs échos multiples grâce à une antenne aérienne. Les données enregistrées sur une pellicule ressemblent aux figures d'interférences des hologrammes. Elles sont ensuite combinées et traitées pour créer une image du terrain.

## Une nouvelle science appliquée

Pour ce faire, un système électronique complexe est imaginé, où le signal doit être enregistré sur bande magnétique et filtré analogiquement, grâce à des condensateurs, des bobines d'inductance et d'autres composants électriques; un recours aux ordinateurs numériques assez primitifs qui commencent à être disponibles à cette époque est aussi envisagé. Mais entre 1954 et 1959, Leith et ses collègues conçoivent une nouvelle solution, utilisant un système de traitement optique. Ils mélangent la théorie de l'optique physique à celle des télécommunications, qui s'est développée après guerre, pour créer une science appliquée nouvelle et puissante (aussi explorée indé-

pendamment par une poignée de chercheurs français).

À l'époque, la sûreté militaire empêche la publication de leurs résultats. Leith écrira plus tard : « En réalité, l'holographie n'était pas en recul dans la période 1955-1962, comme on pourrait le croire à tort au regard de la littérature publiée. D'une certaine façon, elle était devenue clandestine. » Pendant son temps libre, Leith continue à explorer la nouvelle science appliquée, en particulier après avoir découvert les travaux de Gabor. En 1961, avec son collègue Juris Upatnieks, il élabore une méthode pour encoder, puis reconstruire une image sur un transparent photographique par le processus d'hologramme en deux étapes. Ils résolvent le problème des images superposées en s'inspirant des sciences de la télécommunication (de même que les communications radio reposent sur des ondes qui varient dans le temps, l'information holographique est fondée sur des motifs holographiques variant spatialement). Le motif d'interférences de l'hologramme résulte du mélange de deux signaux, une onde de référence (l'onde monochromatique de départ) et une onde échantillon (issue de la diffraction ou de la réflexion de l'onde de référence par l'objet). En décalant le faisceau de référence et celui d'échantillon afin qu'ils ne soient plus parallèles, les chercheurs réussissent à séparer les deux images : lors de la visualisation, on observe soit l'une, soit l'autre, en fonction de l'angle de vue.

La méthode de Leith et Upatnieks est nommée photographie sans lentille par l'Institut américain de physique. Dans un

premier temps, elle n'a qu'un succès restreint, car elle pâtit également des défauts des sources lumineuses disponibles. La rupture se fera avec l'arrivée des lasers au début des années 1960. En 1963, Leith et Upatnieks s'en servent comme source lumineuse pour enregistrer et reconstruire les images d'objets en trois dimensions. Le réalisme des images obtenues est saisissant : les hologrammes à laser enregistrés sur des plaques sont impossibles à distinguer d'une scène réelle vue à travers une fenêtre. En outre, leur visualisation ne nécessite pas de lunettes spéciales, comme pour les films en trois dimensions arrivés sur le marché un peu plus tôt, ou les dispositifs stéréoscopiques du XIX<sup>e</sup> siècle ; ces deux dernières techniques consistent à présenter des images différentes à chaque œil, pour permettre au cerveau de reconstituer le relief. Les deux années suivantes, la nouvelle technologie se fait connaître des ingénieurs et des scientifiques du monde entier.

Dès 1966, on comprend que les travaux de Gabor, de Denissiouk et de Leith et Upatnieks peuvent être rassemblés au sein d'un même domaine, que l'on nomme holographie. Les travaux de Denissiouk sont réhabilités dans son pays. Les recherches soviétiques dans ce domaine sont soutenues par le gouvernement, qui en fait une vitrine scientifique dans le cadre de la guerre froide. Quant à Gabor, qui considérait pourtant ses travaux comme un échec, il sera le seul lauréat du prix Nobel 1971 de physique, une victoire controversée. Simple nou-

veauté peu prometteuse à visée théorique 20 ans plus tôt, l'holographie est devenue un domaine en plein essor, dont on s'arrache la paternité.

À partir du milieu des années 1960, universités et laboratoires industriels se bousculent pour explorer l'holographie, cherchant à lui trouver des applications et à l'améliorer. Le nombre de publications sur le sujet est multiplié par 25 avant la fin de la décennie, et les entreprises qui misent sur son exploitation commerciale se multiplient. Les Laboratoires *Willow Run* ont une longueur d'avance. Ils inventent des techniques d'interférométrie holographique pour visualiser et quantifier les déformations d'échantillons mécaniques, telle la dilatation due à la chaleur. Leur méthode peut aussi révéler précisément les contours d'un volume, les modes de vibration de pièces utilisées dans les bâtiments ou les machines, les détails des écoulements aéronautiques, des défauts de soudure... Les mesures faites par holographie offrent une sensibilité inégalée.

## Les innovations s'enchaînent

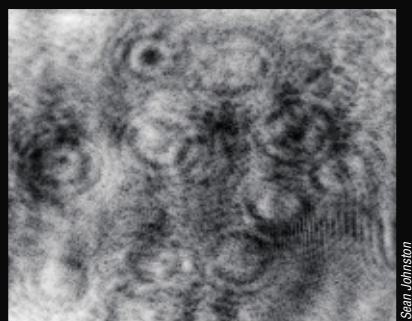
Les Laboratoires *Willow Run* donnent rapidement naissance à des sociétés commerciales, telle *Conductron Corporation*. Celle-ci réalise une série d'innovations. À la fin des années 1960, elle produit de gros hologrammes de démonstration pour les compagnies automobiles et des hologrammes de série

insérés dans une encyclopédie scientifique. Elle développe un laser à impulsions, qui émet une série de flashes et permet pour la première fois d'enregistrer des hologrammes de personnes vivantes ; auparavant, on utilisait des objets inanimés, car le sujet devait rester absolument immobile. Il sert aussi à analyser des phénomènes fugaces, tels un impact de balle, un mélange de combustibles ou la formation de nuages. L'entreprise crée des hologrammes à plusieurs couleurs en combinant des lasers rouge, vert et bleu pour l'enregistrement et le visionnage. Elle met au point les techniques nécessaires à la réalisation de courts dessins animés holographiques. Kip Siegel, le fondateur de *Conductron*, prédit un grand avenir commercial aux hologrammes. Il annonce la télévision, le cinéma et les films amateurs holographiques pour la décennie à venir, et charge publiquement ses employés de se préparer à « holographier » les prochains jeux Olympiques.

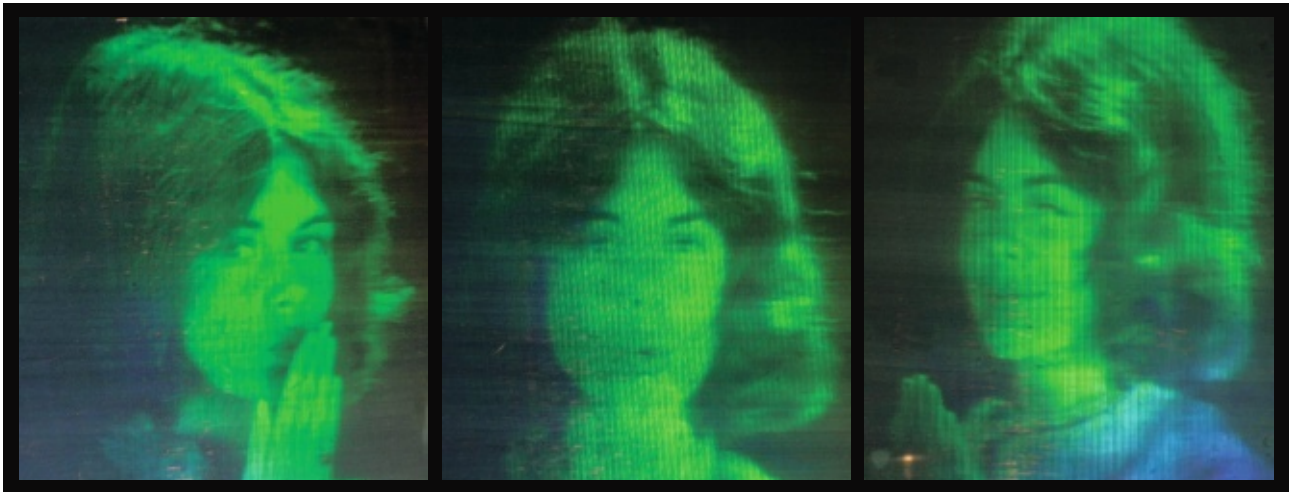
L'holographie devient plus familière, et on commence à comparer son évolution à celle de la photographie. Les premiers équipements étaient chers, nécessitaient des temps d'exposition longs, et étaient techniquement limités ; en quelques années, des hologrammes plus rapides, de meilleure qualité, moins chers et plus variés deviennent disponibles, et l'expertise redescend des chercheurs vers les ingénieurs et les entrepreneurs.

Cependant, les prédictions de Siegel dépassent de beaucoup les extrapolations techniques les plus optimistes, et les ingénieurs sont plus prudents que les commerciaux. Elles reposent sur une foi dans le progrès scientifique, technique et économique, largement partagée par ses contemporains. Elles sont aussi alimentées par les rapides progrès techniques et les inventions qui continuent de s'enchaîner dans le domaine de l'holographie.

Aux États-Unis, au moins trois équipes indépendantes redécouvrent les hologrammes de Denissiouk, dont les travaux sont passés inaperçus à l'Ouest. Bien qu'enregistrés avec un laser monochromatique, les hologrammes de ce type peuvent être visionnés avec une lumière blanche, comme les photographies de Lippmann. Ils fournissent alors une image en trois dimensions, qui apparaît derrière la plaque. L'enregistrement est aussi très simple : il suffit de placer la plaque photographique devant l'objet à enregistrer, puis de les éclairer tous deux avec un unique faisceau



**5. DES HOLOGRAMMES DE SUJETS MOBILES** peuvent être créés grâce à des lasers à impulsions. L'un des plus anciens montre un homme qui utilise une perceuse (*ci-contre*). Les dessins à sa surface indiquent que l'homme a bougé entre deux flashes du laser lors de l'enregistrement. Cet hologramme ainsi que tous ceux de type Leith-Upatnieks nécessitent des lasers pour être visionnés, sinon la plaque holographique (*ci-dessus*) ne ressemble pas à l'image d'origine.



© Jonathan Ross/Hologrammes créés par la Multiplex Company

laser. Le procédé est alors exploité par les musées soviétiques, qui réalisent des hologrammes de leurs collections ; ceux-ci connaissent une popularité croissante à partir des années 1970 dans le cadre d'expositions itinérantes.

D'autres types d'hologrammes en lumière blanche sont élaborés. Les plus simples sont enregistrés en utilisant une lentille pour focaliser la lumière diffractée par l'objet dans le plan de la plaque holographique. Les hologrammes de ce type, dits à plan-image, sont de plus en plus explorés à partir de 1966. Éclairés avec une source de lumière blanche, ils créent une image qui semble chevaucher la plaque, et dont les points les plus éloignés apparaissent plus flous que les plus proches. En adaptant légèrement le dispositif optique, on peut faire apparaître l'image devant la plaque holographique, comme si elle était suspendue dans l'espace en face du spectateur.

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 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, sont irréalistes : les hologrammes nécessitent une plaque d'enregistrement et apparaissent toujours entre cette plaque et le spectateur.

Une variante intéressante des hologrammes est développée en 1968 par Stephen Benton, travaillant alors pour la Société *Polaroid*, et rendue publique au début des années 1970. Généralement qualifié d'arc-en-ciel, son hologramme est

fendu horizontalement, ce qui entraîne des propriétés optiques inédites : lorsqu'on bouge la tête de bas en haut, on observe un changement de couleur de l'image (car la fente disperse les longueurs d'onde de la lumière blanche), au lieu de voir par-dessus l'objet de premier plan comme dans les autres types d'hologrammes.

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, ce stéréogramme est une série d'hologrammes de Leith-Upatnieks juxtaposés, chacun formant une bande verticale. Si on courbe le stéréogramme en un cylindre, chaque œil voit des bandes différentes ; ainsi, une scène tridimensionnelle est reconstituée. L'avantage d'un stéréogramme est que chacun des hologrammes qui le composent peut être enregistré à partir des images bidimensionnelles d'un film tourné de façon classique.

Dans les années 1980, de nouvelles méthodes de fabrication permettent de produire des hologrammes de réflexion bon marché à partir de modèles : au lieu de créer un motif d'interférences dans la profondeur d'un matériau photosensible, telle une émulsion photographique, on « sculpte » ce motif à la surface du matériau. Dès lors, on peut le reproduire en masse par des techniques d'estampillage. On obtient des images peu esthétiques, mais au relief impressionnant. L'holographie trouve alors plusieurs nouvelles applications, telles que la publicité dans les magazines et les dispositifs anticontrefaçon appliqués sur les emballages ou les cartes bancaires. Depuis, les hologrammes sont partout.

**6. LE STÉRÉOGRAMME HOLOGRAPHIQUE**  
le plus vu des années 1970, *Le Baiser II*, était enroulé sur un cylindre. Lorsqu'on tourne le cylindre, on voit les images ci-dessus, en relief, qui se succèdent.

#### L'AUTEUR



Sean F. JOHNSTON est enseignant-chercheur en histoire des sciences et de la technologie à l'Université de Glasgow, en Écosse.

Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

#### ✓ BIBLIOGRAPHIE

S. A. Benton et V. M. Bove Jr., *Holographic Imaging*, Wiley-Interscience, 2008.

S. Johnston, *Holographic Visions : A History of New Science*, Oxford University Press, 2006.

U. Schnars et W. Jüptner, *Digital Holography : Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction and Related Techniques*, Springer, 2004.

J. Ludman et al. (eds.), *Holography for the New Millennium*, Springer, 2002.



Dès la fin des années 1960, l'holographie a dépassé le cadre scientifique. De petites expositions publiques d'hologrammes sont présentées dans des laboratoires universitaires de physique, et les journaux décrivent les travaux de Leith et Upatnieks à un public enthousiaste. En avril 1980, *Pour la Science* expliquait même dans sa rubrique *Expériences d'amateur* comment enregistrer et visionner des hologrammes à l'aide de lasers artisanaux. Quelques artistes commencent à s'intéresser à cette nouvelle technologie, en particulier ceux des mouvements *Art et Technologie* et *Art et Science*...

Bien que les hologrammes aient impressionné les premiers spectateurs, leurs sujets (en général des natures mortes improvisées à partir d'équipements de laboratoire ou de bibelots) lassent rapidement. S'ouvre alors une phase d'exploration esthétique. Certains comparent le potentiel de l'holographie artistique au travail d'Andy Warhol et de Robert Rauschenberg. Scientifiques et artistes coopèrent au sein de cette nouvelle discipline. L'artiste Bruce Naumann, par exemple, utilise le laser à impulsions de *Conductron* pour enregistrer ses grimaces.

Certains pionniers de la discipline ont un bagage technique associé à des dispositions artistiques. Ainsi, Lloyd Cross, après avoir travaillé aux Laboratoires *Willow Run* et fondé une des premières entreprises de lasers, rejoint la firme *Conductron*, puis invente un appareil pour réaliser des spectacles à effets de lumière et coproduit une des premières expositions d'art holographique, *N-dimensional Space*, au Musée d'art

de Finch College, à New York, en 1970. En 1968, il imaginait l'holographie comme « un artisanat, un art ou un commerce ».

En 1971, Cross s'installe avec d'autres artistes à San Francisco, où ils fondent une école d'holographie pour le grand public. Bientôt envahie d'étudiants, l'école offre une vision contre-culturelle de l'holographie, liant l'enseignement technique à l'épanouissement personnel, les états modifiés de conscience et même les expériences psychédéliques. Ses membres développent un équipement bon marché facilement transportable, ce qui met un terme à l'exclusivité des laboratoires scientifiques et démocratise l'accès à la technologie. D'autres écoles d'holographie s'implantent rapidement à New York, Chicago et, dès la fin des années 1970, dans toute l'Europe.

## Gloire et déclin des hologrammes sur le marché de l'art

Malgré le déclin des innovations commerciales au fil des années 1960, la diffusion des hologrammes auprès du public augmente exponentiellement à la fin des années 1970, où fleurissent quelque 500 expositions. Celles-ci 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. Cela va de pair avec l'arrivée des hologrammes produits en masse et les compromis qui en résultent en termes de qualité. En outre, les holo-

grammes ne nécessitant pas de lasers impressionnent moins le public, qui ne les associe plus au progrès. Et quand ils commencent à orner les encarts publicitaires des magazines, les emballages de dentifrice et les pastilles de sécurité des cartes de crédit, le marché artistique semble condamné.

Un tel destin n'est pas rare en science et en technologie. À certains égards, le désintérêt des artistes et des consommateurs pour l'holographie est à rapprocher du sort des autres techniques 3D, telle la stéréoscopie. Inventée et commercialisée à grande échelle au XIX<sup>e</sup> siècle, la stéréoscopie a été améliorée au début du XX<sup>e</sup> siècle grâce aux techniques d'impression en couleur, avant d'être recyclée en jouet pour enfants dans les années 1930. De même, les hologrammes se font connaître comme phénomène de galerie, avant de devenir une forme d'art pour la maison et de finir relégués aux albums d'autocollants pour enfants.

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 fait créée par une technique de prestidigitatation, faisant intervenir un jeu de reflets sur un miroir – une technique dite du fantôme de Pepper, du nom de son inventeur au XIX<sup>e</sup> siècle.

Comment expliquer le déclin de l'holographie, dont les possibilités semblaient inépuisables à la fin des années 1960 ? Les efforts de recherche pendant les phases les plus actives ont conduit à des études redondantes, à une surabondance de publications et à une confusion sur le plan de la propriété intellectuelle (ce qui posait problème pour les brevets et entravait la commercialisation). Les promesses de contrats étant peu respectées, le sujet a acquis une mauvaise réputation. Par conséquent, la terminologie a changé plusieurs fois pour éviter de discréditer les nouvelles recherches, rendant l'évolution du domaine difficile à suivre, aussi bien pour ses acteurs que pour les analystes.

Malgré tout, la recherche et le développement en holographie se poursuivent plus discrètement aujourd'hui. Au cours de la dernière décennie, les ordinateurs ont beaucoup apporté au domaine. Grâce à leur puis-



© Bob Jacobson/Corbis

**7. DES HOLOGRAMMES DE SÉCURITÉ**, très difficiles à contrefaire, sont inclus notamment sur les cartes bancaires et les emballages. Avec l'arrivée de ces images d'assez mauvaise qualité dans les années 1980, les hologrammes ont envahi notre vie quotidienne.



sance de calcul, on synthétise des hologrammes de plus en plus vite; on peut ensuite soit les enregistrer sur des pellicules, comme le fait la Société Zebra Imaging (voir la figure 8), soit les projeter sur un écran en temps réel grâce à divers dispositifs. Toutefois, les calculs sont très compliqués, et la transmission en temps réel d'hologrammes numériques de haute qualité (le vieux objectif de la télévision holographique) continue à se heurter à des problèmes techniques.

Un autre objectif à long terme s'est rapproché: le stockage de données *via* des hologrammes inscrits dans des matériaux tels que des photopolymères (qui se transforment sous l'action de la lumière) et des cristaux. De tels systèmes pourraient dépasser largement les capacités de stockage des technologies optoélectroniques actuelles, tels les DVD-ROM, mais on ne sait pas encore effacer des données ni les réécrire aussi facilement que sur les disques magnétiques.

D'autres applications continuent de se développer. Les hologrammes de sécurité évoluent rapidement pour conserver une longueur d'avance sur les contrefaçons. De nombreux dispositifs, tels des écrans radar



**8. CET HOLOGRAMME** présente une vue en couleur d'un modèle infographique de Seattle. Le motif a été créé par ordinateur. L'utilisation de l'informatique rend la synthèse d'hologrammes plus rapide, même si la quantité de calculs nécessaires reste une difficulté.

d'avions ou des lecteurs de codes-barres, incluent des composants dits holographiques: ce sont des éléments dont la surface est sculptée comme celle des hologrammes, ce qui leur confère des propriétés optiques particulières; un seul d'entre eux peut par exemple combiner les propriétés d'un miroir, d'une lentille et d'un prisme.

Leith affirmait que les méthodes de manipulation de la lumière développées par l'holographie continueraient à donner naissance à de nouvelles applications, qu'il regroupait sous le terme de transholographie. Citons par exemple la conjugaison de phase, une méthode corrigeant les déformations subies par les fronts d'ondes optiques lors de la traversée d'un milieu; on améliore ainsi les images de l'espace lointain qui arrivent sur les télescopes après avoir franchi l'atmosphère terrestre. En outre, les principes holographiques sont maintenant appliqués avec succès à d'autres formes d'ondes, telles les ondes électroniques, auxquelles s'intéressait Gabor il y a 65 ans. Bien que moins sous les feux de la rampe, l'holographie est donc encore bien vivante...



# VOYAGER DANS LE TEMPS

La marche des sciences

Aurélie Luneau  
14h/15h - jeudi  
En partenariat avec *Pour la Science*

franceculture.fr



© 2011 France Culture. Photo: M. Borge. © Philippe Borelli. Courtesy: Jean-Louis. 42427 Paris 2011.



# L'OBSERVATOIRE le plus

## 1. LES ENCEINTES CONCENTRIQUES

de *La Fortaleza* constituent l'une des structures les plus étonnantes du site de Chanquillo. La nature de cette imposante structure large de 300 mètres est incertaine, mais il est probable qu'il s'agisse d'un temple fortifié.





# SOLAIRE

## ancien d'Amérique

Iván Ghezzi et Clive Ruggles

Occupé dès le IV<sup>e</sup> siècle avant notre ère, le site pré-inca de Chanquillo, au Pérou, est doté d'un observatoire.

Tout indique qu'il servait à établir un calendrier dans le cadre d'un culte solaire.

### L'ESSENTIEL

✓ Situé dans le désert côtier d'Ancash, sur la côte Nord du Pérou, Chanquillo est un immense site dédié à un culte solaire pratiqué il y a 2 300 ans.

✓ Chanquillo comportait un temple fortifié et une colline crénelée de tours servant à repérer les événements solaires et à diviser l'année en périodes distinctes.

✓ Les restes d'offrandes retrouvés suggèrent qu'une élite guerrière avait créé et entretenait, à la faveur de grandes cérémonies, un culte solaire destiné à maintenir son pouvoir.

Service aérophotographique national, Pérou

Sur la côte péruvienne Nord, à quelque 400 kilomètres de Lima, se trouve le centre cérémoniel de Chanquillo. Ce vaste complexe d'édifices et de places serait vieux de 23 siècles. Sa fonction fait depuis longtemps l'objet de nombreuses interprétations. On a ainsi supposé qu'il pourrait avoir servi de forteresse, de refuge, voire être une sorte de temple cloîtré où l'on se livrait à des batailles rituelles. Les recherches, dont nous allons exposer ici les principaux résultats, nous conduisent pour notre part à penser que Chanquillo est le plus ancien observatoire solaire d'Amérique et qu'il était un lieu dédié au culte solaire.

En archéo-astronomie (archéologie des astronomies du passé), le terme d'observatoire est à employer avec précaution, car il évoque de supposés anciens « astronomes ». Les observatoires du passé nous renseignent plutôt sur la façon dont les Anciens percevaient, ordonnaient et contrôlaient le monde.

Nous savons aujourd'hui que les calendriers fondés sur l'observation des positions du Soleil sur l'horizon – ce que l'on nomme les calendriers d'horizon –

jouaient un grand rôle chez les peuples américains. Dans la civilisation maya, par exemple, la détermination et la prédiction des cycles célestes servaient davantage à dire l'avenir ou à la divination qu'à réguler les activités saisonnières. Dans d'autres régions de l'Amérique centrale, l'étude de l'orientation des édifices sacrés et de la disposition des cités suggère l'existence de calendriers d'horizon attribuant une importance particulière à certaines dates clés. Outre les solstices, ces dates comprenaient les passages du Soleil au zénith et d'autres encore, dérivées des premières, mais toutes inscrites dans l'entrecroisement complexe des cycles du calendrier méso-américain.

En ce qui concerne les Andes, les chroniques espagnoles révèlent l'existence chez les Incas de rites et de croyances cosmologiques en rapport avec un culte solaire d'État, qui donnait une grande importance aux cycles astronomiques et au calendrier. Ce culte solaire aurait été créé par l'élite inca pour cultiver l'idée de son origine divine, centraliser le pouvoir et légitimer son autorité. Plusieurs indices historiques et l'étude des alignements de bâtiments