



Courtoisie de la galerie Canesso

IDÉES DE PHYSIQUE

Les hologrammes, du vrai 3D

L'holographie, capable de restituer l'image entière d'un objet dans ses trois dimensions, reste une technique d'avant-garde.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

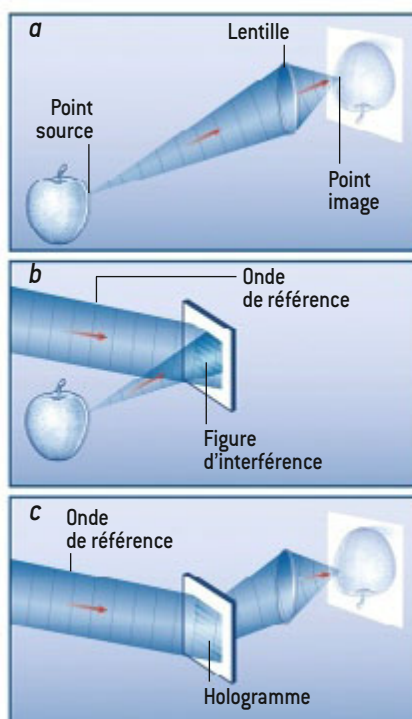
Cinéma 3D, bientôt écrans d'ordinateur et appareils photo 3D : les dispositifs pour voir en relief se multiplient ces derniers temps. Ils sont conçus pour donner l'illusion du relief en jouant avec la vision stéréoscopique humaine. C'est l'occasion de rappeler que l'holographie, elle, peut reconstituer une image tridimensionnelle et fidèle d'un objet quelconque. Et plus qu'une technique de photographie à trois dimensions, l'holographie offre la possibilité de réaliser des composants optiques particuliers ou des procédés optiques d'authentification.

Avant d'aborder l'holographie, rappelons ce qui se passe en photographie. Quand on éclaire un objet opaque, sa surface diffuse de la lumière dans toutes les directions. On peut intercepter cette lumière en regardant l'objet, ou en la focalisant sur une plaque photographique grâce à un objectif. Une photographie est ainsi une projection, sur un plan, d'une scène à trois dimensions. Qu'enregistre-t-elle ?

Sauvegarder la phase de l'onde lumineuse

La lumière visible est composée d'ondes électromagnétiques sinusoïdales de différentes fréquences (ou couleurs). Chacune de ces ondes est caractérisée par l'amplitude de son oscillation, mais aussi par une phase, qui indique à quel stade dans le cycle d'oscillation l'onde se trouve à un instant donné.

Or un capteur photographique, qu'il soit chimique ou électronique, ne reproduit pas



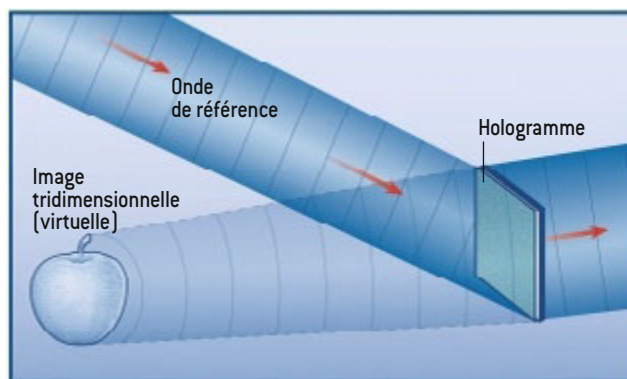
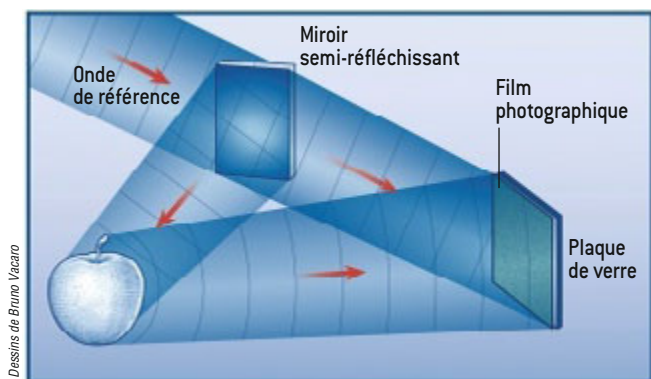
1. GRÂCE À UNE LENTILLE, on focalise la lumière issue d'un point objet en un point image [a]. Le même point image peut être obtenu en l'absence de l'objet, par le principe de l'holographie. La méthode consiste d'abord à créer et enregistrer une figure d'interférence, avec de la lumière laser (monochromatique et cohérente). Si le point source se trouve assez loin face à un écran, ce dernier est éclairé uniformément et la phase de l'onde lumineuse y est constante ; en superposant à cette onde une « onde plane » de référence arrivant de biais, on crée une figure d'interférence formée de bandes alternativement sombres et brillantes [b]. Cette figure étant enregistrée, son éclairage par l'onde de référence restitue le point image, en l'absence du point source [c].

complètement le champ lumineux reçu. En chaque point de détection, il enregistre l'intensité lumineuse moyennée sur la durée d'exposition (soit, à un facteur constant près, le carré de l'amplitude), mais pas les phases des ondes. Or ces phases indiquent les retards relatifs des ondes. Ces retards dépendent de la distance parcourue par les ondes depuis l'objet et portent ainsi en eux une information sur le relief.

D'où l'enjeu : si l'on enregistrerait à la fois l'amplitude et la phase des ondes issues de l'objet, c'est-à-dire le champ électromagnétique original, il serait possible de restituer une image complète, tridimensionnelle, de l'objet. C'est le physicien hongrois Dennis Gabor qui, en 1947, trouva la solution à ce problème dans le cadre de la microscopie électronique. Mais il a fallu l'apparition du laser dans les années 1960 pour que sa solution soit appliquée dans le domaine de l'optique et devienne l'holographie.

Considérons pour simplifier une onde lumineuse monochromatique (d'une seule couleur). Comment mémoriser sa phase ? En la faisant interférer avec une onde de référence qui éclaire simultanément la plaque photographique.

Si, en un point donné, les oscillations des deux ondes sont en phase, elles atteignent leurs maximums en même temps et leur addition donne une amplitude plus élevée, donc une intensité lumineuse supérieure. Si, au contraire, les deux ondes vibrent en opposition de phase, leur addition produit une onde d'amplitude inférieure, donc plus obscure. Le déphasage entre l'onde de référence, parfaitement connue, et l'onde



Dessins de Bruno Vacaro

2. POUR ENREGISTRER L'HOLOGRAMME D'UN OBJET, on envoie le faisceau laser de référence sur un miroir semi-réfléchissant (*ci-dessus, à gauche*). Une partie de l'onde lumineuse atteint le film photographique directement, tandis que l'autre va vers l'objet. Une fraction de l'onde réfléchiée et diffusée par l'objet atteint le film photographique et y interfère avec l'onde de référence. La figure d'interférence (qui,

pour un objet non ponctuel, ressemble à un ensemble aléatoire de taches, des « tavelures ») est enregistrée par le film photographique. Dans la phase de restitution (*à droite*), on éclaire l'hologramme ainsi obtenu avec l'onde de référence ; le faisceau qui en ressort forme une image tridimensionnelle (et virtuelle, car elle se situe dans le prolongement imaginaire du faisceau) de l'objet.

lumineuse dépend du lieu : sur la plaque photographique apparaît alors une figure d'interférence. Cette répartition inégale de l'intensité lumineuse code la phase de l'onde à enregistrer (*voir la figure 1*).

Ce qui est remarquable, c'est que la photographie de cette figure d'interférence permet de reconstituer l'onde initiale. Comment ? Réalisons à partir de cette photo une diapositive en « positif », c'est-à-dire opaque pour les zones obscures et transparente pour les zones brillantes. Éclairons cette diapositive, nommée hologramme par transmission, avec une onde identique à l'onde de référence. Dans le plan de cette diapositive, l'intensité de la lumière est proportionnelle à celle qui résulte de la figure d'interférence. En outre, là où l'intensité est maximale (respectivement minimale), la phase, qui est celle de l'onde de référence, est identique (respectivement opposée) à celle de l'onde enregistrée.

Comme à travers une fenêtre

Autrement dit, dans ce plan, on a restitué exactement les caractéristiques de l'onde à enregistrer. Or les équations de propagation de la lumière assurent que si l'on a reconstitué l'onde dans un plan, tel est aussi le cas pour la propagation au-delà de ce plan. C'est le « principe de Huygens-Fres-

nel ». La lumière qui émerge de l'hologramme est donc identique à celle initialement issue de l'objet et de l'onde de référence (*voir la figure 2*).

En regardant à travers l'hologramme, on apercevra l'objet comme à travers une fenêtre : il paraîtra plus proche si l'on s'avance, on verra apparaître des parties cachées en se déplaçant sur le côté, il restera entièrement visible en ne conservant qu'un morceau d'hologramme comme à travers une fenêtre partiellement obstruée. Les calculs confirment que ce que nous venons d'esquisser est exact (à ceci près qu'ils prévoient aussi la formation d'une image réelle fantôme, qu'il est en pratique facile d'éliminer).

Quelques astuces ont rapidement permis d'étendre la fidélité de la reproduction holographique. En enregistrant successivement, sur la même plaque photographique, trois hologrammes en trois couleurs de base (rouge, vert et bleu), on reconstitue une image en couleurs en éclairant l'hologramme en lumière blanche. En entourant un objet par un film cylindrique et en l'éclairant avec l'onde de référence par le dessus, on pourra observer son image sous tous les angles, lors de la restitution, en tournant autour de l'hologramme cylindrique. Et en profitant de l'épaisseur de la plaque photographique, on peut conserver dans un même hologramme des milliers d'images.

LES AUTEURS



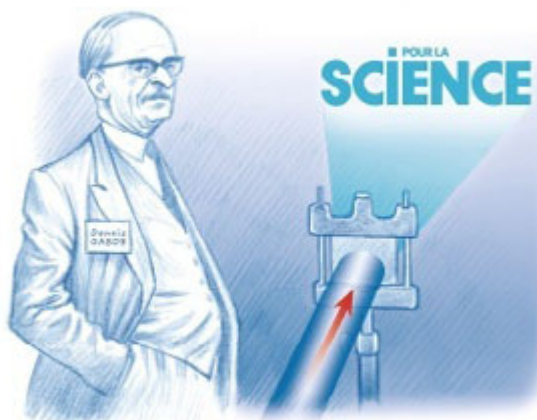
Jean-Michel COURTUY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://idphys.free.fr>

✓ BIBLIOGRAPHIE

F. Wyrowski et O. Bryngdahl, *Digital holography as part of diffractive optics*, *Reports on Progress in Physics*, vol. 54(12), pp. 1481-1571, 1991.

M. Françon, *L'optique moderne et ses développements depuis l'apparition du laser*, Hachette/CNRS, 1986.

Retrouvez les articles de J.-M. Courtuy et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr



3. ON PEUT CRÉER DES HOLOGRAMMES

synthétiques en calculant numériquement la figure d'interférence que créeraient une onde de référence et un objet imaginaire. On peut aussi calculer et réaliser l'hologramme qui, éclairé par le faisceau de référence, projetera une image donnée sur un écran. L'avantage est que le système de projection est très simple et que l'image projetée est nette partout (mais à chaque image correspondra un hologramme différent).

Certaines applications sont cependant plus inattendues. De même que l'on réalise des images de synthèse, il est maintenant possible de faire des hologrammes synthétiques, en calculant numériquement la figure d'interférence créée entre une onde de référence et un objet virtuel. Des techniques de microlithographie permettent

alors de réaliser un hologramme qui, une fois éclairé par l'onde de référence, reconstituera en trois dimensions l'image d'un objet n'ayant jamais existé !

Par ailleurs, il est habituel d'enregistrer et de reconstituer l'onde qui provient d'un objet ; mais il est tout à fait possible de reconstituer l'onde qui part d'un dispositif tel qu'un projecteur. Dans ce cas, l'onde issue

de l'hologramme forme une image avec un dispositif particulièrement simple, compact et robuste qui ne demande aucun réglage : un laser éclairant une lame de verre ou de plastique sur laquelle l'hologramme est imprimé (voir la figure 3).

Les hologrammes sont aussi très utiles pour authentifier ou sécuriser divers dispositifs, tels les billets de banque de forte valeur ou les cartes de paiement. Dans ces applications, l'hologramme est imprimé en relief : c'est dans la profondeur que la gravure retranscrit la phase de l'onde. Ces hologrammes sont très difficiles à reproduire, qu'il s'agisse de les imprimer ou de réaliser l'original qui sert à l'impression. Il est en outre possible d'ajouter à l'image du motif visible une image aléatoire que seul le possesseur du filtre adapté pourra identifier.

**Mardi 16 novembre 2010 à 18h30
au Palais de la Découverte**

Raconte-moi un chercheur

Pour la Science, en partenariat avec le Palais de la Découverte, vous convie, chaque mois, à passer une heure avec un scientifique.

Comment est-il devenu chercheur ?
Quelles sont les différentes facettes de son métier ?
En quoi consiste son travail au quotidien ?

Invité

Hervé This
dirige le Groupe INRA de gastronomie moléculaire au Laboratoire de chimie d'AgroParisTech. Il est aussi directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Acad. des sciences).

En vous faisant partager leur expérience et en rendant leur métier plus concret, ces chercheurs ont une ambition : vous faire partager leur passion pour la science !

Palais de la Découverte • Avenue Franklin-D. Roosevelt • 75008 Paris

SCIENCE Palais de la Découverte

SCIENCE & GASTRONOMIE

Ces recettes parfois superflues

Combien de temps faut-il pour cuire les viandes ?

L'analyse dimensionnelle offre une réponse... universelle.

Hervé THIS

Dis-moi quel est ton feu, je te dirai qui tu es ! Au début, l'humanité (méritait-elle ce nom ?) mangeait cru. Puis elle apprit à cuire, parce que les aliments cuits sont plus digestes, plus appétissants, comme l'a montré l'étude d'animaux sauvages en captivité, et se conservent mieux. D'abord il y eut le rôtissage, mais, alors que les famines étaient récurrentes, le procédé apparut médiocre : la viande chauffée se contracte, expulsant des jus nutritifs qui sont perdus. S'imposa alors l'usage économiquement judicieux de creuser un trou, d'y mettre de l'eau, et de jeter des pierres chauffées afin de chauffer l'eau où était placée la viande : c'était l'ancêtre de notre pot-au-feu.

Toutefois, la viande rôtie a des attraits que la viande bouillie n'a pas, et le rôtissage est resté un mode de cuisson qui séduit, encore aujourd'hui, au point que les viandes à griller valent souvent trois à quatre fois plus cher que les viandes à braiser.

Entre-temps, il y eut des progrès : d'abord, les cuisiniers comprirent que la viande cuisait tout aussi bien si elle était mise à côté du feu, et non dessus : les rayonnements infrarouges se propagent tout aussi bien horizontalement que verticalement ! En outre, la viande ainsi rôtie est bien supérieure : d'une part, elle ne se couvre pas de particules noires âcres, ni ne se charge de benzopyrènes cancérigènes ; d'autre part, les jus peuvent alors retomber dans une lèchefrite placée sous la viande. Mieux encore, nos ancêtres inventèrent la « coquille », un réflecteur métallique qui, placé derrière la viande, accélérât le rôtissage.

Puis vint la décrépitude : quand le gaz apparut à tous les étages, selon la formule consacrée, on en vint à cuire dans des fours clos, chauffés au gaz, et la guerre fit rage

dans le milieu culinaire. Elle était justifiée, car le résultat donné par le nouveau procédé n'est en rien comparable au véritable rôtissage, en milieu ouvert, dans un air bien sec, qui favorise l'évaporation de l'eau des viandes et amène un joli croustillant.

Demeurent toutefois, dans l'hypothèse d'un véritable rôtissage, des questions : faut-il approcher la viande progressivement de la source de chaleur, ou bien la reculer, ou encore la laisser à une distance constante ? Faut-il badigeonner la surface avec de l'huile pour l'avoir bien croustillante ? Et, surtout, combien de temps faut-il cuire ?

Pour cette dernière question, la technique de l'analyse dimensionnelle donne une réponse qui évite les calculs. Supposons que la température de cuisson soit fixée ou que la puissance de chauffage soit maintenue pendant toute la cuisson. La cuisson de la viande s'effectuant par conduction, à partir de la surface, on comprend que la masse de la pièce à rôtir soit un paramètre essentiel, relié d'ailleurs au « rayon » [si l'on suppose que la viande est une boule, ou un cylindre dont on néglige les extrémités]. D'autres paramètres s'imposent : d'abord la conductivité thermique, puisque la viande cuira plus vite si la conduction se fait bien ; ensuite la capacité calorifique, puisque la chaleur se transmet si elle n'est pas stockée ; enfin la densité de la viande.

En première approximation, supposons que le temps de cuisson soit proportionnel à la masse à une certaine puissance a , multipliée par la densité à une puissance b , multipliée par la conductivité thermique à une puissance c , multipliée par la capacité calorifique à une puissance d . Le temps s'exprime en secondes, tandis que les autres paramètres ont leurs propres unités, respectivement le kilogramme, le kilogramme

par mètre cube, le mètre kilogramme par seconde et par degré, le mètre carré par seconde carrée et par degré.

Au total, il faut que les puissances a, b, c, d , soient choisies de telle sorte que l'égalité du temps et du produit des quatre autres paramètres soit assurée, du point de vue des unités. Une simple résolution d'un petit système linéaire d'équations conduit à conclure que le temps de cuisson est proportionnel à la masse à la puissance $2/3$, à la densité à la puissance $1/3$, à la capacité calorifique, et à l'inverse de la conductivité thermique.

Retenons surtout que le temps de cuisson varie comme la masse à la puissance $2/3$. Est-ce réaliste ? Madame Saint Ange, auteur d'un *best-seller* culinaire un peu ancien (1925), mais toujours réédité, conseille de cuire 15 à 16 minutes par livre pour un rôti de un kilogramme, mais seulement 10 à 12 minutes par livre pour un rôti de 1,8 à 2 kilogrammes. Si l'on divise le temps de cuisson par la masse à la puissance $2/3$, on obtient 32 dans le premier cas, et 30,2 dans le second : le facteur de proportionnalité est donc raisonnablement constant, surtout si l'on tient compte des incertitudes des recommandations culinaires. Bref, l'analyse dimensionnelle, un outil trop oublié et pourtant d'application aisée, réfute l'aphorisme selon lequel on deviendrait cuisinier, mais on naîtrait rôtiisseur !



Hervé THIS dirige le Groupe INRA de gastronomie moléculaire au Laboratoire de chimie d'AgroParisTech. Il est aussi directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Acad. des sciences).



Retrouvez les articles de Hervé THIS sur www.pourlascience.fr