



ARRÊTER LA LUMIÈRE, la figer en plein vol, une idée impossible, réservée à la science-fiction ? Non. Grâce notamment à des condensats de Bose-Einstein – des gaz d'atomes ultrafroids qui ont des propriétés quantiques étonnantes –, les physiciens sont capables de ralentir une impulsion lumineuse.

à celle dans le vide, car les atomes mis en vibration par son passage la réémettent avec un retard. Ainsi, la vitesse de phase de la lumière dans l'eau est, par rapport au vide, réduite d'un quart. Ce phénomène est à l'origine de la réfraction, que l'on caractérise par un « indice de réfraction » : le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et sa vitesse de phase dans un milieu transparent.

Même dans les cas les plus extrêmes, la réduction de la vitesse de phase est modeste : dans le diamant, dont l'indice de réfraction vaut 2,4, la lumière se propage à 125 000 kilomètres par seconde. On est encore loin de l'arrêter comme le fait Kylo Ren !

Coup de froid sur la lumière

Les physiciens ont trouvé le moyen de ralentir très fortement la lumière en jouant sur la vitesse de groupe. Pour ce faire, il faut créer artificiellement une forte dispersion dans un milieu. Imaginée dans les années 1910 par les physiciens français Léon Brillouin et allemand Arnold Sommerfeld, la lumière « lente » est restée une curiosité théorique jusqu'en 1999. L'équipe de la physicienne danoise Lene Vestergaard Hau, de l'université Harvard, a alors réussi à ralentir un faisceau lumineux à la vitesse d'environ 60 kilomètres par heure. Et l'année suivante, elle a ralenti la lumière à la vitesse d'un marcheur ! Pour réussir ce tour de force, deux ingrédients ont été nécessaires : un laser

de commande qui produit de fortes densités d'énergie lumineuse et un condensat de Bose-Einstein, un gaz ultrafroid (à une fraction de degré au-dessus du zéro absolu), qui peut absorber fortement la lumière sur une faible distance, de l'ordre du centimètre.

Le laser de commande agit sur le gaz et le rend transparent autour d'une fréquence bien précise. L'indice de réfraction du gaz subit aussi une variation brutale sur le même intervalle de fréquence. Grâce à la transparence induite par le laser, une impulsion lumineuse ayant la bonne fréquence traverse le gaz sans être absorbée, et l'on montre que sa vitesse de groupe est d'autant plus faible que la variation de l'indice de réfraction est grande.

Dans cette expérience, il est même possible de stopper complètement l'impulsion en éteignant le laser de commande au moment où, ralentie, elle se trouve tout entière dans le condensat de Bose-Einstein. Lorsqu'on rallume le laser de commande, l'impulsion lumineuse repart et se propage comme si de rien n'était. Ce processus ne permet toutefois de stocker l'impulsion lumineuse qu'une milliseconde avant qu'elle ne se dégrade définitivement, à cause de l'agitation résiduelle des atomes du gaz froid.

Depuis cette expérience fondatrice, d'autres équipes ont cherché à ralentir la lumière dans un milieu moins difficile à produire qu'un condensat de Bose-Einstein. Ainsi, en 2003, l'équipe de Robert Boyd, de l'université de Rochester, a ralenti la lumière à une centaine de mètres par seconde dans

un cristal d'alexandrite (un oxyde de béryllium et d'aluminium) à température ambiante. Et en 2004, l'équipe de Luc Thévenaz, à l'École polytechnique fédérale de Lausanne, a réussi à ralentir la lumière dans une fibre optique classique.

Si l'on comprend pourquoi Kylo Ren veut arrêter le tir laser de Poe Dameron, à quoi peut bien servir la lumière lente ? Une application concerne les routeurs et les commutateurs des réseaux de communication. Ils sont pour l'instant électroniques ; les remplacer par leurs équivalents optiques augmenterait la rapidité des commutations et la lumière lente permettrait de mettre les paquets en attente avant de les regrouper.

On pourrait aussi réaliser des antennes à commande de phase pour les radars et la téléphonie mobile. Ces antennes sont constituées de petits éléments qui émettent le même signal, mais retardé d'un élément à l'autre. En modulant, grâce à la lumière lente, le retard entre les éléments, on focaliserait à volonté l'onde résultant de la superposition de tous les signaux élémentaires.

Si les physiciens savent désormais faire varier la vitesse de groupe de la lumière dans des proportions considérables, une question reste en suspens : comment fait Kylo Ren pour créer un condensat de Bose-Einstein avec la Force ? ■

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay. J.-Sébastien STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. Marc BOULAY est sculpteur numérique.

Complétez votre collection !



Retrouvez tous les numéros depuis 1996 !

Commandez vos numéros sur
www.pourlascience.fr

POUR LA
SCIENCE | **ARCHIVES**



IDÉES DE PHYSIQUE

Le fantôme du candidat

Faire apparaître sur scène un personnage qui se trouve à mille lieues de là n'a rien d'impossible : il suffit de projeter à plat son image, d'utiliser un film semi-transparent et de jouer sur les ombres et les lumières.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Tout récemment, l'utilisation d'« hologrammes » lors de spectacles musicaux ou de réunions politiques a fait le tour des médias : le public découvrait sur scène une image réaliste en relief (on dit de nos jours « 3D ») de danseurs ou d'un candidat à l'élection présidentielle, sans avoir besoin de lunettes spéciales.

En réalité, il ne s'agit pas d'hologrammes, mais d'une simple projection sur un écran semi-transparent. C'est une adaptation d'une méthode connue depuis le XIX^e siècle, sous le nom de fantôme de Pepper. Comment cette projection, qui inspire aujourd'hui les dispositifs d'« affichage tête haute » développés pour les pilotes d'avions et les conducteurs de voitures, crée-t-elle l'illusion du relief ?

Illusions au théâtre

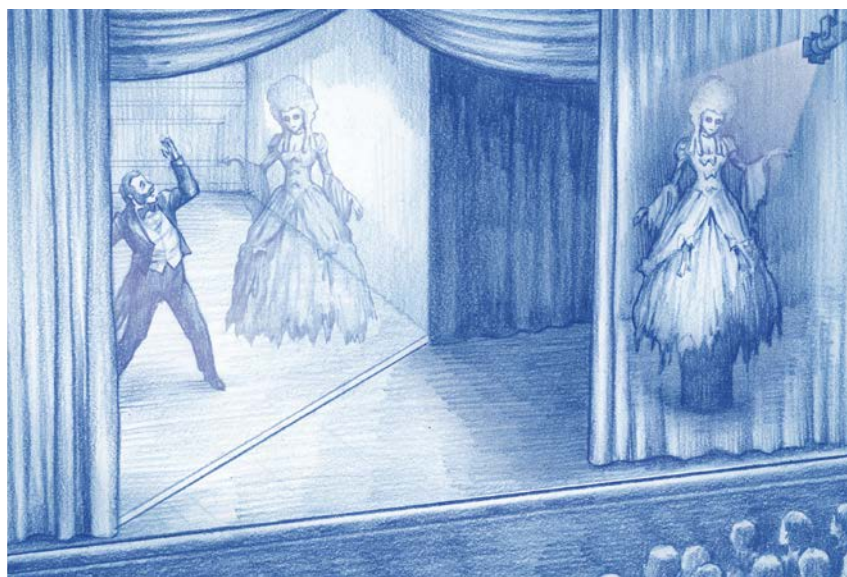
Revenons au XIX^e siècle. À cette époque où le spiritisme est en plein essor, Henry Dircks, un ingénieur anglais, invente (en 1858) un dispositif pour faire apparaître des fantômes sur une scène de théâtre. Il utilise pour ce faire une trappe, des miroirs et des jeux de lumière. Le principe de base est particulièrement simple et, comme nous allons le voir, nous l'avons tous involontairement expérimenté.

Lorsque, une fois la nuit tombée, nous entrons dans une pièce dont les volets ne sont pas fermés, nous voyons très bien

l'extérieur à travers la vitre, dont nous pouvons même douter de la présence lorsqu'elle est parfaitement propre. En revanche, dès que nous allumons la lumière dans la pièce, la fraction réfléchie par la vitre (environ 8 %) est bien plus intense que la lumière qui nous parvient de l'extérieur. La vue de l'extérieur est alors remplacée par la vue de l'intérieur, sauf pour les objets lumineux (lampadaires de rue, phares des voitures...) qui viennent se superposer au reflet déjà

présent. Réciproquement, en plein jour, on observe à travers la vitre l'image de la lampe allumée dans la pièce, superposée à la vue de l'extérieur.

Pour réaliser cette superposition d'images à des fins théâtrales, Henry Dircks eut l'idée de faire remonter à travers une trappe, et à l'aide d'un miroir incliné à 45 degrés, l'image d'une pièce située sous la scène vers une vitre disposée devant la scène avec la même inclinaison.



UN FANTÔME SUR SCÈNE : cet effet peut être obtenu grâce à une vitre verticale orientée à 45 degrés par rapport aux spectateurs. Ces derniers voient le reflet d'un personnage présent dans les coulisses (à droite) et qui leur est caché. Les coulisses sont dans l'obscurité, mais le personnage à faire apparaître de façon fantomatique est éclairé.

■ LES AUTEURS



Jean-Michel COURTUY
et Édouard KIERLIK
sont professeurs
de physique à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris.
Leur blog : www.scilogs.fr/idees-de-physique

Leur dernier livre s'intitule :
En avant la physique !
(Belin-Pour la Science, 2017).

John Pepper, un chimiste, britannique lui aussi, simplifia grandement le dispositif en le réduisant à une simple plaque de verre, placée devant la scène fortement éclairée. Cette plaque réfléchit le contenu d'une pièce obscure cachée sur le côté (*voir l'illustration page précédente*). Quand la lumière de la pièce cachée est allumée et que celle de la scène est réduite, une forme lumineuse apparaît brusquement devant l'auditoire ! Succès assuré pour cette technique, que l'on retrouve aujourd'hui sous une forme adaptée dans les maisons hantées et autres trains fantômes des parcs d'attraction.

Une image projetée

Le procédé que l'on vient de décrire fait apparaître l'image d'un objet (ou d'un personnage) réel situé à proximité de la scène, mais caché du public. Comment faire apparaître une image de synthèse ou celle d'une personne absente ? En remplaçant la pièce cachée par un écran sur lequel est projetée l'image que l'on veut faire apparaître (*voir l'illustration ci-dessous*). La luminosité des projecteurs actuels permet en effet d'obtenir une image aussi lumineuse qu'une personne réellement sur scène.

Toutefois, de nombreux problèmes pratiques sont à régler pour créer l'illusion de volume et de la profondeur. Il faut pour

ce faire s'appuyer à la fois sur des astuces de physique et sur une bonne compréhension de nos perceptions.

Tout d'abord, il est hors de question d'utiliser une vitre. Outre la difficulté à la fabriquer en très grand format et à la transporter, une vitre présente une épaisseur et deux faces. Lorsqu'elle est fortement éclairée, se créent alors deux reflets, donc deux images, malgré les traitements antireflets qui ne font qu'atténuer un peu l'effet. Ce dédoublement n'est pas forcément gênant pour un fantôme, car cela accentue son immatérialité. En revanche, pour figurer une personne réelle, c'est rédhibitoire.

C'est pourquoi on préfère aujourd'hui aux vitres des films souples semi-transparents de type Mylar. Les difficultés ne sont hélas pas supprimées : d'une part le film doit être sans pli et suffisamment tendu pour ne pas vibrer au moindre courant d'air. D'autre part, sur le plan optique, le film doit se comporter de la même manière avec toutes les composantes de la lumière blanche, et cela tant en réflexion, pour ne pas perturber les couleurs de l'image, qu'en transmission, pour ne pas affecter celles des personnes ou du décor placés derrière le film.

Les meilleurs films s'approchent de plus en plus de ce comportement, mais il est bien souvent nécessaire de compenser certains défauts en ajustant savamment l'éclairage. Il faut ensuite ajuster la géométrie afin que le reflet de la projection se trouve au bon endroit pour le spectateur, notamment si l'on souhaite faire interagir la personne projetée avec une personne réelle présente sur scène.

Tout se passe alors comme si le projecteur renvoyait directement l'image sur un écran situé sur la scène. Mais comment fait-on pour donner l'impression d'avoir devant soi une personne en chair et en os dans ses trois dimensions ?

Premier point : il faut faire oublier la présence d'un écran. Pour atteindre cet objectif, il est essentiel que la personne projetée soit, dans l'image, sur fond noir, ce qu'on réalise lors de la prise de vue ou par un traitement d'image. Il faut ensuite veiller à ce qu'il n'y ait aucune réflexion parasite

UNE IMAGE PROJETÉE sur un plan horizontal, invisible des spectateurs, et qui se reflète dans un film semi-transparent incliné verticalement à 45 degrés permet de donner l'illusion qu'un personnage est présent sur scène.





LE PRINCIPE DES DISPOSITIFS D’AFFICHAGE TÊTE HAUTE

est le même que celui des fantômes de Pepper et effets apparentés. S’y ajoute un système optique permettant de former l’image à une distance appropriée devant la personne, de telle façon qu’elle n’ait pas à accommoder ses yeux pour lire les informations affichées.

sur l’écran. Cela étant réglé, nous disposons alors d’une image bidimensionnelle au centre de la scène, dont on s’assure qu’elle respecte les règles de la perspective (taille et position de l’image par rapport au sol).

De la lumière en relief

Mais d’où vient l’illusion du relief ? À quelques mètres de distance et sur fond noir, la parallaxe (chacun de nos yeux perçoit des images différentes, ce qui nous aide à localiser l’objet regardé dans son environnement) et l’accommodation (qui permet de voir net à courte distance) jouent peu. Elles ont des rôles mineurs, au contraire de l’éclairage et des ombres propres : ce sont les différences de luminosité entre les diverses parties du visage ou du corps et la manière dont ces écarts de luminosité varient lorsque la personne se tourne ou se déplace qui fournissent à notre cerveau des indices sur sa forme et son volume.

Cela signifie que les éclairages de la scène de projection et de la scène de prise

de vue doivent être rigoureusement identiques. En choisissant qui plus est des éclairages qui marquent bien les reliefs, nos sens sont dupés et l’illusion devient parfaite.

Aujourd’hui, on utilise aussi la superposition d’une image dans une scène dans les « affichages tête haute » destinés aux pilotes d’avions ou aux conducteurs de véhicules. Il s’agit de dispositifs qui affichent, dans le champ de vision de la personne au volant ou aux manettes, des informations sous une forme transparente, qui ne masquent pas la scène située au-delà (voir l’illustration ci-contre). Le pilote ou le conducteur n’a ainsi pas besoin de tourner la tête ou les yeux pour les lire, contrairement à la situation où les informations sont lues sur le tableau de bord.

Affichage accommodant

Le grand avantage de ces dispositifs est que l’on peut former l’image à bonne distance devant le conducteur, de façon que celui-ci n’ait pas besoin d’accommoder sans cesse ses yeux lorsque son regard passe de la route aux informations affichées et inversement. Ces efforts d’accommodation se révèlent en effet encore plus fatigants que les mouvements oculaires.

Le principe de l’affichage tête haute est exactement le même que pour les fantômes de Pepper. Ainsi, pour les automobilistes, la projection a lieu soit sur une lame semi-transparente inclinée et placée dans le champ de vision, soit directement sur le pare-brise.

Toutefois, les contraintes géométriques sont différentes, car il faut former l’image à une distance appropriée du conducteur. En pratique, on choisit une distance de l’ordre de 2,5 mètres pour les informations telles que la vitesse et les limitations de vitesse. Pour les nouveaux affichages, qui incluent des informations de type « réalité augmentée », l’image est formée à plusieurs mètres pour qu’elle soit bien intégrée à la scène. Cela exige des dispositifs optiques assez élaborés qui agrandissent l’image et décalent sa position à l’aide de lentilles ou de miroirs courbes, mais le confort d’utilisation est devenu remarquable. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

S. W. Patterson et K. P. Zetie, *Exorcising Pepper's ghost*, *Physics Education*, vol. 52(2), article 023007, 2017.

M. K. Hedili *et al.*, *Micro lens array-based high-gain screen design for direct projection head-up displays*, *Applied Optics*, vol. 52(6), pp. 1351-1357, 2013.

QUESTION AUX EXPERTS

Pourquoi les sondages électoraux se trompent-ils ?

Trois principales raisons expliquent que les sondages n'indiquent pas toujours l'état véritable de l'opinion.

Pascal MOLINER



Les sondages électoraux produisent des résultats qui, le plus souvent, se confirment dans les urnes. Toutefois, il arrive qu'ils se trompent de façon spectaculaire : par exemple le 21 avril 2002 en France lors de la qualification de Jean-Marie Le Pen au deuxième tour de l'élection présidentielle, le 23 juin 2016 lors du référendum sur l'appartenance du Royaume-Uni à l'Union européenne, ou encore le 8 novembre 2016 avec la victoire de Donald Trump à l'élection présidentielle des États-Unis. Trois grands facteurs peuvent être à l'origine de ces erreurs.

Tout d'abord, on comprend qu'un sondage sera moins fiable si on le réalise auprès d'un échantillon qui ne reflète pas au plus près les caractéristiques de la population globale appelée à voter. Pour s'approcher au mieux de cette représentativité, les sondeurs pratiquent le « redressement des résultats bruts » : ils mesurent les biais connus et corrigent.

Toutefois, en matière de sondage politique, cette méthode n'est possible que lorsque le scrutin anticipé peut être comparé à un scrutin antérieur. Ce n'est pas toujours le cas, comme en témoignent les récentes primaires de la droite en France ou le référendum sur le Brexit. En outre, puisque les sondages sont réalisés par téléphone ou *via* Internet, ils laissent dans l'ombre des pans entiers de la population : ceux qui n'ont pas de poste de téléphone fixe ou qui n'ont pas d'accès au Web.

Un deuxième facteur est que, avec l'emprise décroissante des grandes idéologies, le vote est de moins en moins une expression identitaire et de plus en plus un choix raisonné ou au contraire pulsionnel. Dans le premier cas, il résulte d'un calcul dont la solution peut n'apparaître clairement aux électeurs qu'à quelques jours du scrutin (par exemple celui du premier tour des primaires de la droite). Dans le second, la pulsion peut longtemps rester contrôlée jusqu'à ce qu'elle s'exprime dans l'isolement, laissant parfois un goût amer à l'électeur qui vient de l'assouvir (cas du vote pour ou contre le Brexit).

Dans tous les cas, le vote peut être précédé d'une longue période d'indécision. Sa déconnexion des identités sociales, familiales et parfois même politiques accroît son imprévisibilité, y compris aux yeux de l'électeur lui-même.

Non-représentativité de l'échantillon, volatilité et masquage des opinions

Un troisième facteur est le phénomène de « zone muette », étudié en psychologie sociale depuis les années 2000. Il se produit lorsqu'une opinion est discréditée par un ou plusieurs groupes occupant des positions de domination sociale (autorité morale, médias prépondérants, pouvoir financier, etc.). Confrontés à la pression normative de ces groupes, les individus

mentent pour masquer leur adhésion à l'opinion indésirable, car son affichage constitue une menace identitaire. C'est ce qui explique que le masquage peut se produire même dans des conditions d'anonymat.

Mais les sondés ont un autre moyen de masquer leurs opinions : refuser de participer au sondage. Les personnes qui adhèrent à une opinion contre-normative seront alors sous-représentées. Pour endiguer le phénomène, les sondeurs tentent de redresser leurs échantillons, mais dans quelles proportions faut-il le faire ? À l'évidence, ces proportions étaient insuffisantes en 2002, lors de l'élection présidentielle française.

Le meilleur moyen de neutraliser le masquage consiste à faire baisser la pression normative sur les sondés. Dans ce sens, il vaudrait peut-être mieux ne pas interroger ces derniers sur leurs intentions personnelles, mais plutôt sur ce qu'ils perçoivent des intentions de vote de leur entourage proche.

Non-représentativité, volatilité et masquage peuvent évidemment se cumuler ou interagir. Les problèmes de représentativité trouveront probablement des solutions techniques. Il en va autrement de la volatilité ou du masquage, qui concernent davantage le rapport des citoyens au pouvoir politique ou médiatique et aux sondages. En l'absence de réponses à ces difficultés, l'avenir des sondages électoraux sera compromis.

Pascal MOLINER est professeur de psychologie sociale à l'université de Montpellier III.