

SCIENCE & FICTION

Ralentir la lumière avec la Force

Depuis quelques années, contrôler la lumière jusqu'à la figer sur place n'est plus l'apanage de personnages de fiction. Les physiciens ont trouvé le moyen de la ralentir en laboratoire !

Roland LEHOUCQ et Jean-Sébastien STEYER. Illustration : Marc BOULAY

L'introductio du film *Star Wars : Le Réveil de la Force* (J. J. Abrams, 2015) montre une scène étonnante : Kylo Ren, le successeur de Dark Vador, utilise la Force pour stopper le tir de pistolet laser de Poe Dameron, le meilleur pilote de la Résistance. Par « stopper », il faut comprendre « arrêter en l'air » le pinceau lumineux émis par l'arme. Une fois le héros capturé, Kylo Ren retourne dans son vaisseau et la lumière stoppée redémarre.

Jouer ainsi avec la vitesse de la lumière n'est pas une première dans les œuvres de fiction. Dans son roman *Le Maître de la lumière*, publié en 1933, Maurice Renard narre une banale histoire de pièce hantée. Mais on n'y trouve nul fantôme. La clé du mystère est l'étrange « luminite » : « la lumière cheminant dans cette matière à une vitesse extrêmement freinée, on voit, de part et d'autre des plaques de luminite, ce qui se trouvait là jadis. Et plus la plaque est épaisse, plus le passé qu'elle montre est lointain, sur une face comme sur une autre. »

On retrouve la même idée dans la nouvelle *Lumière des jours enfuis* de l'écrivain britannique Bob Shaw (1966) où le « verre lent » est un matériau que la lumière met des années à traverser. Le procédé invoqué pour expliquer le phénomène est « un tunnel en spirale enroulé à l'extérieur du rayon de capture de chaque atome du verre ». L'argument ne paraît pas très scientifique, même si les mots utilisés veulent montrer le contraire. Dans sa série de romans de fantasy burlesque, *Les*



GRÂCE À LA « FORCE », Kylo Ren, l'un des méchants du film *Star Wars : Le Réveil de la Force* (2015), est capable de stopper un tir de pistolet laser.

Annales du Disque-monde (à partir de 1983), Terry Pratchett ne s'embarrasse pas de détails techniques pour justifier que, dans son univers, la lumière ne se propage qu'à quelques centaines de kilomètres par heure : c'est tout simplement à cause de « l'intensité plutôt embarrassante du champ de magie ».

Dans notre monde, est-il possible de ralentir la lumière ? Avant de répondre à cette question, il faut se rappeler que la lumière est une onde électromagnétique et qu'on peut lui associer plusieurs vitesses. La vitesse de phase est la vitesse de l'onde porteuse, autrement dit celle à laquelle les maxima et les minima d'une onde électromagnétique sinusoïdale se déplacent. Dans tous les milieux matériels, la vitesse de phase d'une telle onde dépend de sa fréquence. Ces milieux sont dits dispersifs.

Superposer des ondes de diverses fréquences permet d'obtenir une onde plus complexe dont on définit la vitesse de groupe comme celle de l'enveloppe de l'onde. Pour une impulsion lumineuse utilisée dans les communications, la vitesse de groupe est celle du maximum de l'amplitude de l'impulsion et aussi celle à laquelle l'énergie se propage. Cette distinction entre vitesse de phase et vitesse de groupe a été proposée en 1880 par le physicien français Georges Gouy. En effet, ces vitesses sont *a priori* différentes, sauf dans le vide où elles se confondent et valent environ 300 000 kilomètres par seconde.

Lorsque la lumière traverse un milieu transparent, sa vitesse de phase est inférieure



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.