



# La question qui tue !

## Peut-on dépasser la vitesse de la lumière ?

### La (première) réponse qui achève...

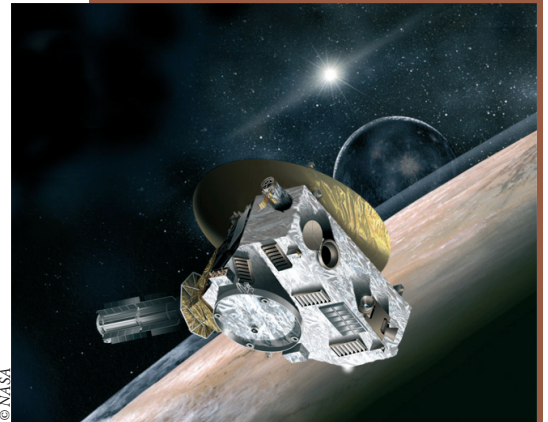
Dans le vide, la lumière se déplace à une vitesse d'environ 300 000 km/ s : la mesure la plus précise à ce jour donne une valeur de 299 792,458 km/ s. Cette grandeur est une constante fondamentale de la physique, que l'on note  $c$ , pour célérité. C'est là une vitesse certes très grande, mais pas infinie, et il est naturel de se demander s'il est possible de se déplacer plus rapidement que la lumière.

Si tel était le cas, on pourrait imaginer de nombreuses expériences amusantes. Par exemple, supposez que vous vous déplaçiez – par le moyen de votre choix – plus vite que la lumière, c'est-à-dire plus vite que votre propre image. Soudainement, vous vous arrêtez et vous regardez en arrière. Après quelques instants, votre image, qui voyage, elle, à la vitesse  $c$ , vous rattrapera : vous vous verrez ainsi arriver alors que vous êtes déjà sur place ! Mais plus fascinant encore... les rayons lumineux qui vous parviendront en premier seront ceux qui auront eu le moins de distance à parcourir, c'est-à-dire ceux qui auront été émis les derniers. Les images de votre arrivée défileront donc à l'envers... Bizarre ? Vous avez dit bizarre ?

Au début du vingtième siècle, les physiciens réalisèrent que la vitesse de la lumière était la même pour toute une catégorie de référentiels appelés inertiels, c'est-à-dire qui sont en mouvement de translation les uns par rapport aux autres (voir « Théorie »). Cette observation les contraignit à modifier profondément les concepts d'espace et de temps, ce qui conduisit à l'élaboration de la théorie de la relativité restreinte. Une conséquence remarquable de cette théorie : deux référentiels inertiels ne peuvent se déplacer l'un par rapport à l'autre avec une vitesse supérieure à celle de la lumière dans le vide. Il est par conséquent impossible de dépasser la vitesse  $c$ ... Dommage pour l'expérience imaginaire que nous venons de décrire ! Il reste toujours la possibilité de se filmer avec un caméscope et de se passer le film à l'envers... mais c'est certainement moins rigolo.

En fait, la théorie de la relativité restreinte proscrit complètement la possibilité de déplacements à des vitesses « supraluminales », supérieures à  $c$ , qui sont souvent nécessaires dans les histoires de science-fiction pour traverser l'Univers en quelques secondes. En sciences-réalité, il faut compter environ neuf mois pour atteindre notre voisine Mars avec les moyens de propulsion actuels, onze ans pour Pluton aux confins du système solaire... et quelques quarante milliards d'années pour la galaxie d'Andromède, l'une des plus proches de notre Voie Lactée. Notez que même en voyageant à la vitesse de la lumière, ce dernier voyage nécessiterait environ trois millions d'années : prévoir de la lecture !

L'existence d'une vitesse limite indépassable a de nombreuses autres conséquences profondes. Aucun signal et donc aucune information physique ne peuvent se propager à une vitesse supérieure à  $c$ . Considérons, par exemple, deux charges électriques qui interagissent. Que se passe-t-il



La sonde spatiale New Horizons, lancée en janvier 2006 et conçue par la NASA pour explorer Pluton et ses satellites... en 2015.



La vitesse de la lumière obsède bien des physiciens, et leur sert même d'étalon pour leurs mesures ! En effet, le mètre est défini dans le Système International (SI) comme la longueur parcourue par la lumière dans le vide pendant une durée de  $1/299\,792\,458^{\text{ème}}$  de seconde.

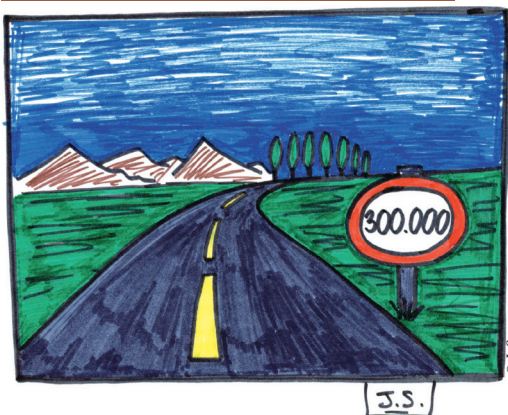


# Peut-on dépasser la vitesse de la lumière ?

## Réfraction

La lumière ne se déplace pas à la même vitesse dans des milieux différents, comme l'eau et l'air par exemple : c'est le phénomène de réfraction. Cet effet est à l'origine de l'effet « loupe » de l'eau : quand on observe un poisson à travers la surface de l'eau, par exemple dans un bocal, il apparaît toujours plus gros qu'il n'est vraiment. Ce phénomène explique aussi pourquoi une paille plongée dans un verre semble brisée.

Au niveau microscopique, ce ralentissement vient de ce que la lumière, constituée de photons, est sans arrêt absorbée puis réémise par les atomes qui constituent le milieu transparent. Ces cycles d'absorption et de émission, répétés un grand nombre de fois, ralentissent le passage des photons à travers le milieu. Certains chercheurs conçoivent actuellement des milieux avec des indices de réfraction très élevés, capables de ralentir fortement la lumière : en 1999, des atomes de sodium convenablement traités propageaient la lumière à la vitesse de... 17 m/s !



si on déplace légèrement une de ces charges ? Cela va modifier le champ électrique subi par la seconde. Cependant, ce changement ne se fera pas sentir instantanément en tout point de l'espace, car cela correspondrait à une vitesse de propagation infinie de l'information. La modification se propagera de proche en proche à vitesse finie, au mieux égale à  $c$ . Ceci exclut donc complètement la possibilité d'interactions instantanées à distance... On parle alors d'interactions « retardées ».

Cette propagation à vitesse finie vaut aussi pour la gravitation : ainsi, la théorie de Newton, qui décrit la force de gravité comme une interaction instantanée à distance, est forcément incomplète ! Ce problème de fond amènera Einstein à construire la théorie de la relativité générale en 1916. Mais ceci est une autre histoire...

Mais que se passe-t-il si on essaie d'accélérer un objet pour rapprocher sa vitesse de celle de la lumière ? Pour des objets de faible vitesse comparée à  $c$ , l'énergie cinétique est proportionnelle au carré de la vitesse : si on va deux fois plus vite, l'énergie cinétique est quadruplée. Mais quand on s'approche de la vitesse limite, la relation entre énergie et vitesse se révèle plus compliquée : l'énergie totale d'un objet de masse  $m$  et de vitesse  $v$  est donnée par

$$E = mc^2 / \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad , \text{ c'est-à-dire } \quad v = c \times \sqrt{1 - (mc^2/E)^2} \quad .$$

Cette relation nous dit que l'énergie augmente indéfiniment pour des vitesses approchant celle de la lumière dans le vide. Et quelle que soit l'énergie fournie à l'objet, sa vitesse restera en-dessous de  $c$ . Mais la relation précédente est de portée bien plus grande que cette simple assertion : elle nous dit que l'énergie d'une particule au repos ( $v = 0$ ) a une valeur bien déterminée, proportionnelle à la masse de la particule :

$$E_0 = mc^2.$$

C'est la fameuse relation d'Einstein qui établit le fait que la « masse » d'un objet est une forme d'énergie : une conséquence inattendue de la théorie de la relativité restreinte, à la base de toute la physique nucléaire et la physique des particules.

## ... mais pas complètement !

La vitesse de la lumière serait donc une limite absolue, indépassable ? À y regarder de plus près, tout n'est peut-être pas perdu. En effet, à strictement parler, la théorie de la relativité restreinte stipule que la vitesse limite est la vitesse  $c$  de la lumière dans le vide. Cependant, la vitesse de déplacement des ondes lumineuses dans un milieu peut être différente de  $c$ . En effet, dans les milieux dits « réfringents », c'est-à-dire transparents comme le verre ou l'eau, elle est en fait égale à  $c' = c/n$ , où  $n$  est appelé **indice de réfraction**. Par exemple, l'indice de réfraction de l'eau est d'environ 1,3, ce qui correspond à une vitesse de propagation de la lumière égale à 230 600 km/s.



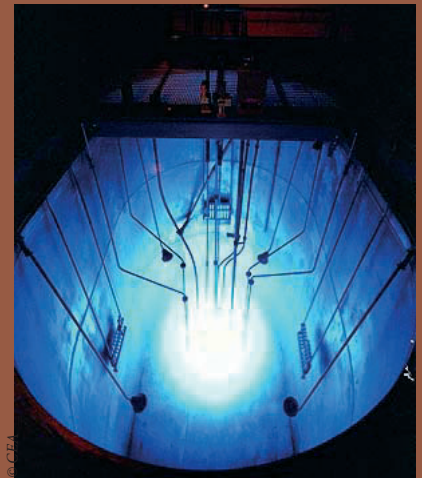
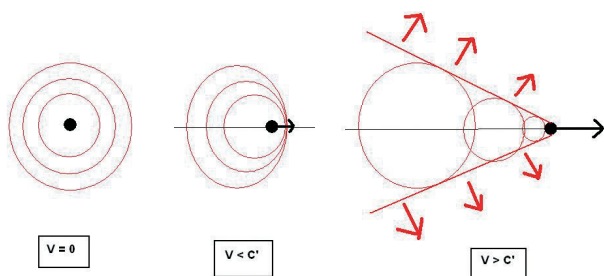
# Peut-on dépasser la vitesse de la lumière ?

Des progrès récents en sciences des matériaux ont même permis de préparer des milieux aux propriétés optiques telles que l'on parvient à y ralentir considérablement, voire même à y piéger complètement la lumière. Il apparaît donc envisageable de se déplacer plus rapidement que la lumière dans un milieu réfringent, tout en respectant la limitation de vitesse absolue imposée par la relativité restreinte : « à vos marques... »

Plus qu'envisageable, c'est en fait possible et même très fréquent... enfin, pour des particules : par exemple, un électron d'énergie égale à 1 MeV se déplace à une vitesse de 257 370 km/s, c'est-à-dire plus vite que la lumière dans l'eau. Que se passe-t-il si un tel électron traverse une cuve remplie d'eau ? L'eau est un milieu diélectrique, c'est-à-dire qu'il répond au passage d'une particule chargée en émettant de la lumière le long de sa trajectoire. Mais notre électron se déplace plus rapidement que la lumière émise ! il laisse donc derrière lui un « sillage » lumineux, qui s'apparente au sillage d'un bateau (ou d'un canard...) à la surface de l'eau – à condition que l'esquif vogue plus rapidement que les vagues produites par son passage.

Ce phénomène est appelé **l'effet Cerenkov** (prononcer « chérènekof »). C'est l'analogue de l'effet Mach pour les ondes sonores. Quand une source sonore se déplace plus rapidement que les ondes qu'elle génère, c'est-à-dire lorsqu'elle dépasse le mur du son, une onde de choc se produit : c'est le « bang » des avions supersoniques. Dans le cas de l'effet Cerenkov, l'onde de choc est un flash lumineux qui poursuit la particule chargée. Cet effet est responsable de la lumière bleue qui emplie les piscines de refroidissement des réacteurs nucléaires : les électrons produits lors des réactions nucléaires sont effectivement plus rapides que la vitesse de la lumière dans l'eau. On utilise aussi la lumière Cerenkov pour détecter le passage de particules chargées et énergétiques, que ce soit dans l'atmosphère, par exemple pour le télescope HESS, ou dans des cuves remplies d'eau, comme c'est le cas dans les expériences AUGER ou SuperkamiokaNDE, que vous pouvez découvrir dans les rubriques « Expérience » et « Découverte ».

Il est donc possible de se déplacer plus vite que la lumière. Il suffit pour cela de lui mettre des bâtons dans les roues... grâce à un milieu qui la ralentisse. Dans la vie courante, il nous faudrait tout de même quelques efforts pour passer le « mur de la lumière » : l'indice de réfraction de l'air est de 1,0003, ce qui correspond à une vitesse  $c' = 299\,700$  km/s. Gare aux radars !



Piscine de refroidissement, illuminée par effet Cerenkov.

## Effet Cerenkov

Tiens, une ambulance garée à proximité vient de mettre en marche sa sirène. Tututut... elle émet alors des ondes sonores qui se propagent uniformément dans toutes les directions (figure de gauche) à la même vitesse d'environ 340 m/s (la valeur de la vitesse du son dépend du milieu : air, eau, métal...). L'ambulance démarre en trombe et les ondes sonores suivent son déplacement (figure du centre) : à l'avant de l'ambulance, les ondes semblent comprimées, tandis qu'à l'arrière, elles sont étirées. La fréquence du son semble donc plus élevée, et la sirène paraît plus aiguë, quand l'ambulance s'approche de nous... et plus grave quand elle s'éloigne. Cette variation de fréquence, appelée effet Doppler, sert à mesurer à l'aide d'ondes la vitesse de nombreux objets en mouvement (voitures, débit sanguin, galaxies...).

Imaginons que notre ambulance, munie de moteurs surpuissants dignes du Concorde, accélère sa course folle... Les ondes sont de plus en plus comprimées et empilées vers l'avant, jusqu'au moment où la vitesse de l'ambulance dépasse celle à laquelle les ondes se propagent (340 m/s, tout de même !). Que se passe-t-il alors ? À l'arrière de notre ambulance supersonique se développe une onde de choc, correspondant à une perturbation brutale du milieu (voir figure de droite). Cette compression est responsable du bruit caractéristique des avions supersoniques, le « bang ». L'effet Cerenkov est la traduction de ce phénomène pour des ondes lumineuses. Rappelons que le mur du son n'a été franchi pour la première fois qu'en 1947 par C. Yeager, et que l'effet Cerenkov a été découvert et expliqué à peine quelques années plus tard (prix Nobel 1958).