

Hypothèse

L'Ether est le milieu dans lequel la lumière vibre ; il est le repère privilégié pour mesurer sa vitesse (ou plutôt sa fréquence).

Si on émet un rayon dans une source au repos dans l'éther, on obtient cette vitesse (cette fréquence)

Si j'émet un rayon à partir d'une source en mouvement dans l'éther, je dois pouvoir mesurer une variation de la fréquence de la lumière. Analogie : comme l'effet Doppler : je n'entends pas le même son (la même fréquence) dans la voiture de pompier ou sur le trottoir.

Michelson fait faire des parcours qui doivent être de propagation différente par rapport à l'éther.

Une analogie : La terre (avec l'interféromètre) se déplace dans l'éther. Il revient au même de considérer la terre immobile dans un « courant d'éther », comme un bateau à l'ancre dans un fleuve.

On envoie un rayon en aller-retour dans la direction du courant et un rayon en aller-retour transversal au courant, comme ferait deux nageurs, l'un allant et venant dans la direction du courant, l'autre allant et venant transversalement au courant.

Le temps aller-retour dans la direction du courant est supérieur au temps aller-retour transversal au courant. (voir feuille de calcul jointe).

On aurait dû trouver des franges d'interférences lorsque les rayons se rejoignent, indiquant par un décalage des phases, que la propagation était différente.

Il n'en fut rien et toutes les tentatives restèrent vaines. Un « courant d'éther » était absolument indétectable.

Annexe. Citation d'E. Meyerson sur l'Ether, *Identité et réalité*, Félix Alcal, 1926, p. 59-60

« Si l'ondulation, le mouvement, fournissait à l'esprit une image suffisamment claire, le substrat de ce mouvement, l'Ether, demeurerait enveloppé des ténèbres les plus épaisses. Les difficultés et les contradictions entre lesquelles se débattent tous ceux qui ont cherché à se former une idée quelque peu précise de ce « milieu » qu'on est fâché de concevoir tantôt comme continu, tantôt comme composé de particules discrètes, à la fois comme un gaz extrêmement raréfié et comme un solide infiniment plus rigide que l'acier, ont été tant de fois exposées que nous croyons inutile d'y insister davantage. Une difficulté particulière qui occupe beaucoup les physiciens depuis quelques années, est celle résultant des travaux de MM. Michelson et Morley [...] de sorte qu'il est permis de dire qu'à l'heure actuelle, nous ne saurions nous imaginer l'Ether qui nous entoure, ni comme étant en repos, ni comme suivant la terre dans son mouvement, ou plutôt que nous sommes obligés de faire alternativement l'une ou l'autre supposition. Que si, au contraire, nous considérons cette étrange anomalie comme un fait acquis, définitif, nous sommes forcés d'en faire la base d'une théorie embrassant l'ensemble des phénomènes du monde sensible, et ruinant entièrement les fondements du mécanisme tel que le concevait Maxwell ».

L'expérience de Michelson et Morley

Michael Fowler

La nature de la lumière :

A la suite des travaux de [Michelson](#), en 1879, la vitesse lumière était estimée être égale à 186350 miles par seconde (299840 km/s), avec une incertitude de l'ordre de 30 miles par seconde (50 km/s) environ. Cette mesure, s'accordait bien avec des mesures moins directes, basées sur des observations astronomiques. Cependant, cela ne clarifiait pas réellement *la nature* de la lumière. Deux cent ans auparavant, Newton avait suggéré que la lumière est constituée de petites *particules*, produites par un objet chaud, qui se répandent dans l'espace à très grande vitesse, rebondissant sur les autres objets, et qui sont détectées par nos yeux. Le rival traditionnel de Newton, Robert Hooke, quant à lui, pensait que la lumière devait être une sorte de *mouvement ondulatoire*, comme le son.

La nature ondulatoire du son :

Il existe deux propriétés particulières des ondes sonores (en fait de toutes les ondes) qui méritent d'être mentionnées maintenant. La première est appelée *interférence*. Ceci est plus facile à expliquer avec des ondes à la surface de l'eau. Le point important est que, aux endroits où les crêtes des vagues issues des deux sources arrivent en même temps, les ondes travaillent ensemble et l'eau sera très agitée; mais, aux endroits où la crête d'une vague issue d'une source, arrive en même temps que le creux de la vague produite par l'autre source, les ondes s'annulent et l'eau reste tranquille.

La lumière est-elle une onde ?

En conservant à l'esprit ce qui vient d'être dit des propriétés des ondes, reconsidérons la question de savoir si la lumière est un flot de particules ou bien une sorte d'onde. L'argument le plus fort pour une description particulière, est que la lumière se déplace en lignes droites. Vous pouvez entendre derrière un coin, au moins jusqu'à un certain point, mais vous ne pouvez sûrement pas voir. En outre, aucun effet du type interférence n'est très évident pour la lumière. En définitive, on sait depuis longtemps comme nous l'avons vu, que les ondes sonores sont des ondes de compression dans l'air, alors si la lumière est une onde de quelle nature sont ces ondes ? Il est clair que ce ne peut être simplement de l'air, car la lumière nous parvient du soleil, et même des étoiles, et nous savons que l'air ne s'étend pas aussi loin, sinon les planètes auraient depuis longtemps été freinées et arrêtées, dans leur mouvement, par la résistance de l'air.

En dépit de ces objections, il était établi, vers 1800, que la lumière est *en fait* , une sorte d'onde. La raison pour laquelle ce fait est resté aussi longtemps indécelé est que la longueur d'onde de la lumière est vraiment courte : environ 0,5 μm . De la même façon, les situations d'interférence mentionnées ci dessus , pour les ondes sonores ou les rides à la surface d'une mare, mettent en jeu des distances qui varient de la même façon que les longueurs d'ondes impliquées : ces situations d'interférence ne seront normalement guère visibles pour la lumière car intervenant dans des zones de très petite extension. En fait, il existe des façons de mettre en évidence des effets d'interférences avec la lumière. Un exemple familier est donné par les multiples couleurs que l'on voit souvent aux bulles de savon : elles apparaissent, car , lorsque vous regardez une bulle de savon, vous voyez la lumière réfléchiée par les deux faces d'une très mince lame d'eau, (d'épaisseur voisine de la longueur d'onde de la lumière). En

comparaison avec la lumière réfléchiée par la face avant, la lumière réfléchiée par la face arrière de la lame d'eau doit parcourir une distance un peu plus grande pour atteindre vos yeux, aussi l'onde lumineuse doit elle osciller une fois de plus, ou deux avant d'être vue. Ce que vous voyez en réalité est la somme des lumières réfléchiées par les deux faces avant et arrière. Pensons cela maintenant comme la somme d'un ensemble de deux ondes, la lumière sera brillante si la crête des deux ondes arrivent ensemble, sombre si les crêtes des ondes réfléchiées par la face avant arrivent simultanément avec les creux des ondes réfléchiées par la face arrière.

Si la lumière est une onde, qu'est-ce qui oscille ?

En établissant que la lumière est une onde, nous n'avons pas répondu à l'une des questions majeures posée ci dessus : qu'est-ce qui oscille au juste ? Nous comprenons le son comme des ondes de compression dans l'air, mais ce n'est seulement qu'un cas possible, le son se propage aussi au travers des liquides, comme l'eau, et des solides, comme une barre d'acier. Ainsi lorsque le son traverse un matériau, que ce soit de l'air, de l'eau ou un solide, celui ci vibre sur son passage. En prenant cela comme modèle, il était naturel de penser que la lumière devait être constituée d'ondes dans quelque matériau mystérieux appelé *Ether* entourant et pénétrant toutes choses. Cet Ether devait aussi remplir tout l'espace , jusqu'aux étoiles , (puisque nous pouvons voir les étoiles, ce milieu doit s'étendre jusqu'à elles pour transporter la lumière). Réfléchissons un peu aux propriétés que l'éther devrait avoir. Puisque la lumière se déplace si vite, il doit être très léger, et très difficile à comprimer ; et cependant , comme nous l'avons mentionné, il doit se laisser traverser par les corps solides , librement, sans offrir de résistance, sinon les planètes seraient ralenties. Ainsi nous pouvons le décrire comme une espèce de vent fantôme , soufflant à travers la Terre; que pouvons nous prouver de cela ? pouvons nous le détecter ?

Détection du vent d'Ether : L'expérience de Michelson Morley.

La détection du vent d'Ether fut le défi suivant que Michelson se proposa après avoir mesuré la vitesse de la lumière avec autant de précision. Naturellement quelque chose qui permet aux corps solides de le traverser librement ne se laisse pas facilement mettre le grappin dessus. Michelson comprit que, exactement comme la vitesse du son est relative à l'air, la vitesse de la lumière doit être relative à l'éther. Cela doit signifier que si vous pouvez mesurer la vitesse de la lumière avec suffisamment de précision, vous pouvez la mesurer lorsqu'elle remonte le vent, puis lorsqu'elle le suit, et la différence des deux résultats devrait être exactement le double de la vitesse du vent. A ce moment Michelson eut une idée très habile pour détecter le vent d'éther. Comme il l'expliqua a ses enfants (d'après sa fille) à partir de la devinette suivante :

Supposons que nous ayons une rivière de largeur w (disons 100 pieds), et deux nageurs qui nagent tous deux à la même vitesse v , disons 5 pieds par seconde. La rivière coule à allure modérée disons 3 pieds par seconde. Les nageurs font la course de la manière suivante : ils partent tous les deux d'un même point d'une rive. L'un d'eux nage directement à travers la rivière vers le point le plus proche de la rive opposée, puis fait demi tour et revient, l'autre reste d'un même côté de la rivière, remontant le courant sur une distance, mesurée le long de la berge, exactement égale à la largeur de la rivière, puis revient en nageant à son point de départ. Qui gagne ?

Considérons d'abord le nageur qui remonte le courant puis revient. Avec des données raisonnables, la durée totale vaut 62,5 s.

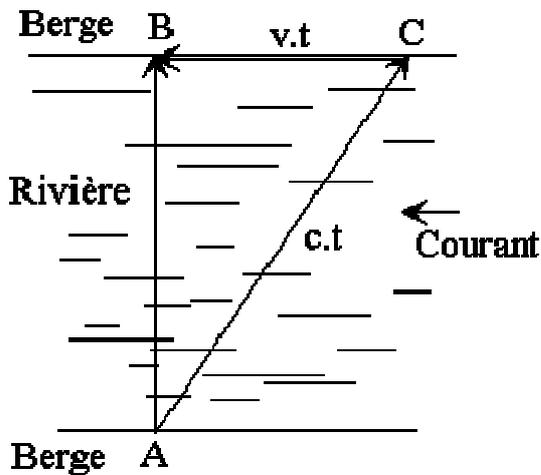


Figure 1 : Pendant la durée t , le nageur s'est déplacé de $c.t$ par rapport à l'eau, et a été transporté vers l'aval, par le courant, d'une distance $v.t$

Le cas du nageur transversal par rapport au courant est plus délicat. Avec les mêmes données, la durée totale de l'aller et retour est donc 50 secondes. Le nageur qui nage transversalement gagne. Cela reste vrai quelle que soit la vitesse de nage (à l'évidence la course n'est possible que si ils peuvent nager plus vite que le courant !).

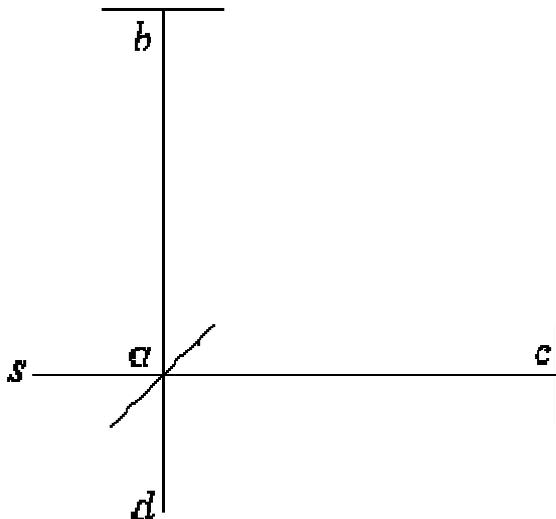


Figure 2 . La source lumineuse est en s , la ligne à 45 degrés est le miroir semi-argenté, b et c sont des miroirs et d , l'observateur.

La grande idée de Michelson fut de construire une course exactement semblable pour des impulsions lumineuses, avec le vent d'éther dans le rôle de la rivière. Le schéma de l'expérience est le suivant : une impulsion lumineuse est envoyée directement avec un angle de 45 degrés sur une lame semi-argentée - constituant un miroir semi-transparent - de façon à ce que la moitié de l'impulsion la traverse et que l'autre moitié est réfléchi. Ces deux demi-impulsions sont les deux nageurs, elles se déplacent toutes deux vers des miroirs distants qui

les réfléchissent vers la lame semi-transparente. A cet endroit elles sont à nouveau à moitié transmises et à moitié réfléchies, mais une lunette est placée derrière la lame semi-transparente comme indiqué sur la figure, ainsi la moitié de chacune des demi-impulsions arrivera dans la lunette. Maintenant si il existe un vent d'éther, quelqu'un regardant dans la lunette verra les moitiés des demi-impulsions arriver à des moments légèrement différents, car l'une aura remonté et descendu le courant et l'autre aura voyagé par le travers du courant, en général.

Réfléchissons un peu à l'ordre de grandeur du délai temporel que nous nous attendons à trouver entre les arrivées des deux demi-impulsions lumineuses. Prenant la vitesse de la lumière relativement à l'éther égale à c miles par secondes, et l'éther coulant au travers du laboratoire à v miles par secondes, parcourir une distance w miles en remontant le courant prendra $w/(c-v)$ secondes, puis pour revenir $w/(c+v)$ secondes.

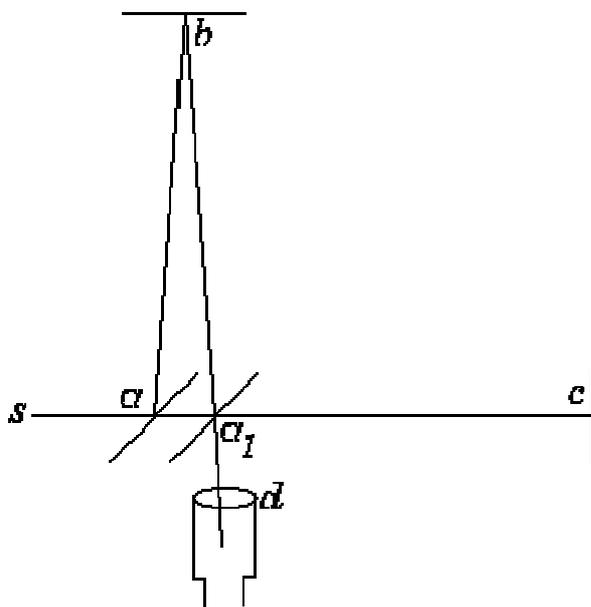


Figure 3 : montre le chemin attendu de la lumière, relativement à l'éther, avec un vent d'éther soufflant.

En comparant les durées des deux trajets nous voyons qu'ils diffèrent d'une quantité égale à $(2.w/c).(v^2/2c^2)$. Remarquons que $2.w/c$ est la durée du trajet dans le cas où il n'y a pas de vent d'éther du tout, soit quelques millièmes de secondes; si nous prenons le vent d'éther de l'ordre de grandeur de la vitesse de déplacement de la Terre sur son orbite, par exemple, alors v/c vaut environ $1/10\ 000$ (soit 10^{-4}) et v^2/c^2 vaut $1/100\ 000\ 000$ (10^{-8} !). Ce qui signifie que la différence des durées des trajets est de l'ordre d'un cent millionième de quelques millièmes de secondes : il semble sans espoir de pouvoir détecter une différence de durées aussi courte. Il se trouve cependant que tel n'est pas le cas, et Michelson fut le premier à indiquer comment faire. L'astuce est d'avoir recours à la propriété d'interférence des ondes lumineuses. Cette suite d'ondes est divisée en deux, puis réfléchi comme nous l'avons décrit. Une des deux parties remonte puis redescend le courant, l'autre partie traverse le courant et revient. Finalement elle se rejoignent et se superposent dans la lunette puis dans l'oeil. Si celle qui prend le chemin le plus long est une demi longueur d'onde en retard, ses creux seront sur le sommet des crêtes de la première onde, ils s'annuleront et on ne verra rien. Si le retard est moindre, il y aura quand même un assombrissement. En faisant tourner l'ensemble de 90 degrés, les rayons montant et descendant le courant et le rayon transversal sont permutés,

maintenant c'est l'autre rayon qui est en retard, aussi en observant dans la lunette , pendant que l'ensemble tourne, on s' attend à observer des variations de luminosité dans la lumière perçue.

Pour augmenter la différence de durée entre les deux chemins suivis, dans l'expérience réelle, la lumière est réfléchi plusieurs fois, en avant et en arrière, (comme une course à plusieurs tours de piste).

Michelson avait calculé qu'un vent d'éther de seulement un ou deux miles par secondes devait avoir un effet observable dans cette expérience, aussi si la vitesse du vent d'éther était de l'ordre de grandeur de la vitesse de la Terre sur son orbite autour du soleil [29 km/s soit une vingtaine de miles par seconde], elle serait facile à voir. En fait *rien ne fut observé* : l'intensité de la lumière ne varie pas du tout. *Quelques temps plus tard, l'expérience fut reprise de façon à ce qu'un vent d'éther produit par la rotation journalière de la Terre autour de son axe puisse être mise en évidence. De nouveau, on ne vit rien.* Finalement, Michelson conjectura que l'éther faisait, peut être, en quelque sorte, pièce avec la Terre, comme l'air de la cabine d'un pont inférieur sur un bateau, aussi refit-il l'expérience au sommet d'une haute montagne en Californie. De nouveau aucun effet ne fut observé. il était difficile de croire que l'éther dans le voisinage immédiat de la Terre était entraîné par celle-ci, car les rayons lumineux provenant des étoiles lointaines seraient déviés en passant de l'éther lointain en mouvement , à l'éther local immobile [par rapport à la Terre].

La seule conclusion possible de cette série d'expériences très difficiles, était que le concept global d'un éther imprégnant tout était faux, depuis le début. Michelson était très peu disposé à penser ainsi. En fait, un point de vue nouveau sur la nature de la lumière était apparu vers les années 1860, à partir du brillant travail théorique de Maxwell, qui avait écrit un ensemble d'équations décrivant comment des champs électriques et magnétiques peuvent s'engendrer les uns les autres. Il avait découvert que ses équations prédisaient qu'il pouvait exister des ondes de champs électriques et magnétiques, et la vitesse de ces ondes déduites à la fois de l'expérience et de la façon dont les champs sont liés entre eux, devait être 186300 miles/s. C'est évidemment la vitesse de la lumière dans le vide, aussi était-il naturel d'admettre que la lumière est formée de champs magnétique et électrique très rapidement variables. Mais ceci mène à un très gros problème : les équations de Maxwell prédisent une vitesse déterminée pour la vitesse de la lumière, et c'est bien cette valeur qui est trouvée expérimentalement , mais par rapport à quoi cette vitesse doit-elle être mesurée ? Le seul intérêt d'introduire un éther, était de fournir une image semblable à celle que nous formons pour le son : ondes de compression dans un certain milieu. La vitesse du son dans l'air est mesurée relativement à l'air. Si le vent souffle vers vous, depuis la source du son, alors vous entendrez le son plus tôt, mais si il n'y a pas éther, alors l'analogie ne tient plus. Alors par rapport à quoi la vitesse de la lumière doit-elle être de 186300 miles par seconde ?

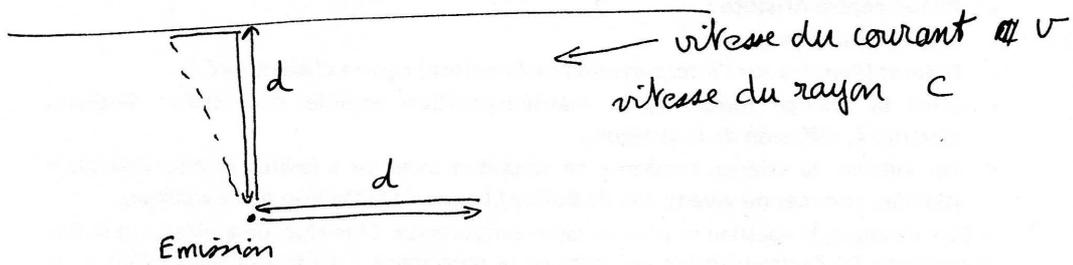
Il existe une autre possibilité évidente, qui est appelée la théorie de l'émetteur -- la vitesse de la lumière est de 186300 miles/s relativement à la source lumineuse. L'analogie est ici entre la lumière émise par une source et les balles tirées par une mitrailleuse. Les balles sortent à une vitesse définie (appelée vitesse d'éjection), relativement au canon de l'arme. Si l'arme est montée à l'avant d'un char, qui se déplace vers l'avant, et quelle est pointée vers l'avant, alors relativement au sol, les balles se déplacent plus vite que si elle sont tirées depuis un char immobile. La manière la plus simple pour tester la théorie de l'émission de la lumière est de mesurer la vitesse de la lumière émise vers l'avant, par une lampe se déplaçant vers l'avant, et de voir si elle dépasse la vitesse connue de propagation de la lumière d'une quantité égale à la vitesse de déplacement de la lampe. En fait ce type de test direct de la théorie de l'émission ne

devint expérimentalement réalisable que dans les années soixante (1960). Il est à présent possible de produire des particules appelées pions neutres, qui se désintègrent chacune dans une petite explosion, en émettant un éclair lumineux. Il est aussi possible d'avoir ces pions se déplaçant vers l'avant à la vitesse de 185000 miles/s quand ils s'autodétruisent, et de capter la lumière émise vers l'avant et de chronométrer cette vitesse. On a trouvé ceci, qu'en dépit de l'effet d'accélération attendu par le fait que la lumière est émise par une source très rapide, la lumière des petites explosions se déplace vers l'avant à la vitesse habituelle de 186300 miles/s [par rapport à nous. N.d.T.].

La réponse d' Einstein

Les résultats des expériences discutées ci dessus semblent nous laisser vraiment bloqués. Apparemment la lumière n'est pas comme le son, avec une vitesse définie relativement à un milieu de propagation sous jacent. De toutes façons elle n'est pas non plus comme des balles, avec une vitesse définie relativement à la source de la lumière. Cependant quand nous mesurons sa vitesse nous obtenons toujours le même résultat. Comment tous ces faits peuvent-ils être interprétés d'une façon simple et cohérente ?

Un calcul comparatif du déplacement longitudinal et transversal



- Calcul du temps Aller / Retour longitudinal
 vitesse aller : $c - v$; temps aller $t_1 = \frac{d}{c - v}$
 vitesse retour : $c + v$; temps retour $t_2 = \frac{d}{c + v}$
 $t_{\text{longit.}} = \frac{d}{c - v} + \frac{d}{c + v} = d \left(\frac{2c}{c^2 - v^2} \right)$

- Calcul du temps Aller-Retour transversal.
 c'est plus compliqué car si la distance relative au milieu est d ,
 la vitesse du courant déporte le rayon d'une longueur $v \cdot t_n$
 on notant t_n le temps du trajet aller,
 la distance du trajet transversal est l'hypoténuse d'un triangle
 rectangle. Soit $d_{\text{trans}}^2 = d^2 + v^2 t_n^2$ ① t_n ou t_{trans} m même chose



c'est la même chose au retour.

Pendant le temps du trajet transversal, le rayon se déplace à la vitesse c . On a donc

② $d_{\text{trans}} = c \cdot t_{\text{trans}}$ donc, d'après ① et ② :

$$c^2 t_{\text{trans}}^2 = d^2 + v^2 t_{\text{trans}}^2 \text{ soit } t_n = \frac{d}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

On multiplie par deux pour aller retour : $t_{\text{h.A.R.}} = \frac{2d}{\sqrt{c^2 - v^2}}$

Résultat : temps ^{direct} longitudinal = $2d \cdot \frac{c}{c^2 - v^2}$
 temps ^{direct} transversale = $2d \cdot \frac{1}{\sqrt{c^2 - v^2}}$

le longitudinal est supérieur au transversal.