

Pourquoi $E = Mc^2$?

Yves Schutz

Pourquoi $E = Mc^2$?

E comme Energie

Lors du premier cours nous avons appris à faire connaissance avec le concept d'énergie, une quantité qui caractérise tout système, mesure la capacité du système à produire un travail et avant tout sa propriété essentielle est de se conserver : l'énergie est une quantité qui se conserve, on ne peut ni créer, ni détruire de l'énergie. On peut seulement la transformer en la dégradant inexorablement jusqu'à la rendre inapte à se transformer davantage.

Alors que pour le concept d'énergie nous apparaît plutôt bien cerné, hormis bien sûr l'énigmatique existence d'une énergie noire nécessaire pour comprendre, avec nos théories actuelles, la dynamique de l'Univers dans son ensemble, il reste pour la masse quelques points noirs à éclaircir.

Pourquoi $E = Mc^2$?

M comme Masse

Nous avons abordé le concept de masse sous deux angles . Celui de quantité de matière qui nous a amené dans l'infiniment petit et celui des « coefficients utiles pour faire des calculs » qui nous a amené dans l'infiniment grand. Dans les deux cas nous nous sommes trouvés face à un mur. A l'échelle de l'Univers, l'invocation d'une mystérieuse masse noire est nécessaire pour comprendre avec les théories actuelles le mouvement des objets dans le cosmos aussi bien les étoiles au sein des galaxies que les galaxies elles-mêmes au sein des amas de galaxies... Masse noire dont, malgré tous les efforts mis en oeuvre, nous ne sommes à ce jour pas parvenus à préciser la nature.

A l'échelle des briques élémentaires de la matière « ordinaire », nous avons appris que les particules élémentaires ne possèdent pas de façon innée une masse mais acquiert leur masse, telle que nous la mesurons actuellement, en interagissant avec un champ présent partout dans l'Univers et dont la valeur non nulle résulte d'une brisure de symétrie au tout début de l'histoire connue de l'Univers. L'existence de ce champ, le champ de Higgs pour faire court, a été révélée expérimentalement très récemment avec l'observation du très médiatique boson de Higgs. Et nous nous sommes étonnés d'apprendre que cette masse ainsi acquise ne comptait qu'à peine pour 1% dans la masse des particules composites : par exemple, la masse du proton est 100 fois plus grande que la somme des masses des 3 quarks qui constituent le proton. « Le tout est plus grand que la somme des parties » aurait dit Aristote !

D'où la question pourquoi pesons-nous autant ? Je vais vous laisser un peu plus de temps pour murir votre réflexion

Pourquoi $E = Mc^2$?

c^2 comme ... c^2

Nous allons nous intéresser aujourd'hui au troisième membre de l'équation c , qui est élevé au carré ce dont nous ne nous préoccupons pas pour le moment. Commençons par un sondage : quels sont ceux qui pensent que c (comme constante) est une constante universelle donnée par la Nature et dont l'existence fait que notre Univers fonctionne ou que la représentation que nous nous en faisons fonctionne ? Quels sont ceux qui pensent que c (comme célérité) représente la vitesse de la lumière ? Peut-être que certains hésitent entre les deux ou ne savent pas ?

C : constante ou célérité ?

Ceux qui pensent que c représente une constante universelle ont raison. Il s'agit bien d'une constante universelle de la Nature, dont la valeur est toujours la même en tout point de l'univers et à chaque instant. Elle structure notre représentation de l'espace-temps.

Pour que l'équation $E=Mc^2$ soit cohérente, avant d'un côté une énergie qui s'exprime en joule et de l'autre une masse qui s'exprime en kilogramme, il faut que l'unité de c soit des mètres par seconde, c'est-à-dire l'unité d'une vitesse. C comme constante représente ainsi, nous en aurons la confirmation la semaine prochaine, la vitesse maximum autorisée dans l'univers ... rien ne peut aller plus vite que c et seules les particules de masse nulle se déplacent exclusivement à cette vitesse.

Donc ceux qui pensent que c représente la vitesse la lumière n'ont pas tort, on peut voir c comme la vitesse de la lumière. Mais encore faudrait-il expliquer ce que fait la vitesse de la lumière dans une équation qui ne décrit aucun mouvement et n'a pas d'affinité particulière avec la lumière.

Essayons d'y voir plus clair, si j'ose dire, et intéressons-nous justement à la vitesse de la lumière puisque tout a commencé par là.

C ... comme célérité de la lumière

C donc comme célérité. Interrogeons le dictionnaire de l'Académie Française. Le mot célérité nous dit-il est emprunté au mot latin *celeritas*, lui même dérivé de *celer* qui veut dire rapide. La célérité a donc selon le dictionnaire le sens de rapidité, promptitude dans l'exécution d'un acte, d'une mission.

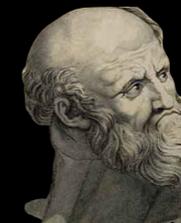
Même si le symbole c n'est utilisé pour désigner la vitesse de la lumière que depuis la deuxième moitié du 19^{ème} siècle, retenons tout de suite que désigner la vitesse de la lumière par c implique que la lumière est un phénomène physique qui se propage rapidement, qui se propage promptement.

Vitesse de la lumière infinie ou finie ?

La question que philosophes et physiciens se sont posée depuis l'antiquité est de savoir si la lumière se propage à une vitesse infinie ou finie. Je ne vais pas vous refaire un cours sur la théorie de la lumière puisqu'un tel cours a été donné il y a deux ans et qu'un autre cours sur l'optique a été donné l'an dernier.

-490

Vitesse de la lumière infinie ou finie ?



Rappelez-vous seulement que les philosophes de l'antiquité associaient toujours le phénomène de la vision à celui de la lumière : la lumière est essentielle pour voir les choses. Ils n'étaient pas tous d'accord sur la nature du phénomène et encore moins sur la vitesse du phénomène.

Empédocle (~-490), qui avait proposé la théorie des 4 éléments contre la théorie atomiste, pensait que la lumière est quelque chose en mouvement et devait donc forcément se propager à une vitesse finie.

Vitesse de la lumière infinie ou finie ?



Aristote (-384, -322) lui ne concevait pas de mouvement mais simplement la présence de quelque chose, la lumière n'a pas de vitesse.

La plupart des philosophes (Euclide, Platon, Lucrèce,...) étaient pourtant plutôt d'accord pour dire que le phénomène de vision procède par l'échange de quelque chose et que cet échange était instantané, c'est-à-dire à une vitesse infinie ? Est-ce-que instantané implique forcément vitesse infinie ? Les synonymes de instantané sont : soudain, brutal, bref, immédiat, rapide, prompt. Ne vaudrait-il pas dire mieux c'est tellement rapide que nos sens imparfaits ne perçoivent pas la finitude de la vitesse de la lumière.

Ainsi, l'ingénieur mathématicien grec (1^{er} siècle de notre ère) Héron d'Alexandrie pensait que la vision était possible grâce à des rayons lumineux émis par les yeux. Selon ce principe, lorsque nous tournons nos yeux clos vers le ciel durant une belle nuit étoilée, et que nous les ouvrons, nous ne devrions apercevoir les étoiles qu'après un certain délai, le temps nécessaire pour la vision d'atteindre des objets aussi éloignés. Constatant l'absence de tout délai (fait expérimental), Héron conclut que la vitesse de la lumière devait être infinie. Nous avons un exemple qu'une théorie fautive et des observations vraies peuvent conduire à des estimations erronées de propriétés physiques.

Vitesse de la lumière infinie ou finie ?



Au cours du haut Moyen-Age des philosophes arabes (Alhazen, Avicenne) reprennent l'idée d'Empédocle à savoir que la lumière est faite d'une substance solide dont la propagation est finie, même si nous ne nous en rendons pas compte ... ça veut dire que ça va trop vite pour nos sens.

Vitesse de la lumière infinie ou finie ?



Pour Kepler il n'y avait pas de doute, l'espace étant vide de toute chose qui pourrait freiner la lumière : la vitesse de la lumière doit donc être infinie.

René Descartes, Discours de la méthode, La dioptrique



Pareil pour Descartes. Il va même jusqu'à lier le sort de toute sa physique à l'instantanéité de la propagation de la lumière. Le mot est dit instantané, que veut dire instantané. Pour l'expliquer Descartes fait l'analogie avec l'aveugle et le bâton dans le recueil La Dioptrique une des suites du Discours de la Méthode publié en 1637 : « Il vous est bien sans doute arrivé quelquefois de nuit sans flambeau, par des lieux un peu difficiles, qu'il fallait vous aider d'un bâton pour vous conduire et vous avez pour lors pu remarquer que vous sentiez par l'entremise de ce bâton les divers objets qui se rencontrent autour de vous et même que vous pouvez distinguer s'il y a des arbres ou des pierres ou du sable ou de l'eau ou de l'herbe ou de la boue ou quelque chose de semblable. [...] **la lumière n'est autre chose dans le corps qu'on nomme lumineux, qu'un certain mouvement, ou une action fort prompte et fort vive, qui passe vers nos yeux par l'entremise de l'air et des autres corps transparents en même façon que le mouvement ou la résistance des corps, que rencontre cet aveugle, passe vers sa main par l'entremise de son bâton [...] il n'est pas besoin de supposer qu'il passe quelque chose de matériel depuis les objets jusqu'à nos yeux pour nous faire voire les couleurs et la lumière.** »

la lumière est un certain mouvement, ou une
action fort prompte et fort vive

Le débat philosophique se poursuit jusqu'au 18^{ème} siècle, siècle dit siècle des lumières, et il en faudra des lumières pour faire toute la lumière sur la vitesse de la lumière !

Il suffit de mesurer la vitesse de la lumière

Pour en finir avec ce débat philosophique, il n'y a qu'une seule issue possible : la mesure, mesurer la vitesse de la lumière. Et cette mesure nous l'avons tous déjà faite un jour de façon rudimentaire certes. Rappelez vous : une nuit d'orage, vous observez les éclairs qui zèbrent le ciel nocturne, vous avez certainement déjà compté les secondes séparant la vue de la lumière de l'éclair jusqu'au moment où vous entendez le tonnerre. Et puis vous avez multiplié ce laps de temps par 330 (la vitesse du son) pour calculer la distance à laquelle la foudre était tombée. Peut-être avez vous aussi conclu sciemment que la vitesse de la lumière était beaucoup plus grande que la vitesse du son.

La même observation avait déjà été faite en 1629 par Isaac Beekman, mathématicien, physicien, médecin, philosophe hollandais en comparant à 1,6 km de distance la vitesse de l'éclair du coup d'un canon et le boum du coup de canon : « la lumière voyage beaucoup plus vite que le son, la propagation est quasi instantanée. »

Nous retrouvons le mot instantané, modéré cette fois-ci par quasi, presque : une propagation instantanée ou autrement dit l'émission et la perception de la lumière sont deux événements simultanés. Il faudra attendre 1905 et la semaine prochaine pour que Einstein définisse ce que l'on doit entendre par simultanéité.

Galilée
Discours et démonstrations mathématiques appartenant à
deux sciences nouvelles



La première mesure de physique, c'est-à-dire une mesure qui suit un protocole clair obéissant à la méthode scientifique énoncée par Galilée, a été réalisée par Galilée lui-même. Il l'a décrite dans son dernier ouvrage publié en 1638 *Discours et démonstrations mathématiques appartenant à deux sciences nouvelles* : un dialogue entre Salviati (celui des 3 compères des Dialogues qui expose et défend les idées de Galilée) et Sagredo le juge impartial mais qui est toujours d'accord avec Salviati. Le troisième interlocuteur, Simplicio, défend l'enseignement de l'école d'Aristote et de ses suiveurs.

Sagredo

Mais de quelle nature et de quelle ampleur devons-nous considérer cette vitesse de la lumière ? Est-elle instantanée ou momentanée, ou nécessite-t-elle, comme d'autres mouvements, du temps ? Ne pouvons-nous pas décider de cela par l'expérience ?

Simplicio

L'expérience quotidienne montre que la propagation de la lumière est instantanée ; lorsque nous voyons un canon tiré à grande distance, l'éclair parvient à nos yeux sans délai, tandis que le son n'arrive à nos oreilles qu'après un intervalle perceptible.

Sagredo

Eh bien, Simplicio, la seule chose que je peux déduire de cette expérience familière, c'est que le son, en atteignant notre oreille, se déplace plus lentement que la lumière ; cela ne me dit pas si l'arrivée de la lumière est instantanée ou si, bien qu'extrêmement rapide, elle occupe encore du temps. Une observation de ce genre ne nous dit rien de plus que celle qui prétend que "Dès que le soleil atteint l'horizon, sa lumière parvient à nos yeux" ; mais qui me garantira que ces rayons n'avaient pas atteint cette limite plus tôt qu'ils n'ont atteint notre vision ?

Salviati

Ces observations étant peu convaincantes, ainsi que d'autres similaires, j'ai été conduit autrefois à concevoir une méthode permettant de déterminer avec précision si l'illumination, c'est-à-dire la propagation de la lumière, est réellement instantanée. Le fait que la vitesse du son soit aussi élevée nous assure que le mouvement de la lumière ne peut qu'être extraordinairement rapide. L'expérience que j'ai conçue était la suivante :

Prenez deux personnes et donnez à chacune une source lumineuse contenue dans une lanterne ou tout autre récipient permettant d'occulter ou de laisser passer la lumière à la vue de l'autre en interposant leur main. Ensuite, placez-les face à face à une distance de quelques coudées et laissez-les s'entraîner jusqu'à acquérir suffisamment d'adresse pour découvrir ou occulter leur lumière dès qu'ils voient celle de leur compagnon. Après quelques essais, la réponse sera si prompte que, sans erreur sensible, la découverte de l'une des lumières sera immédiatement suivie de celle de l'autre, de sorte que dès qu'une lumière est exposée, son compagnon la verra instantanément. Une fois cette compétence acquise à courte distance, les deux expérimentateurs, équipés comme précédemment, prendront des positions séparées par une distance de deux ou trois milles et répéteront la même expérience la nuit, notant attentivement si les découvertes et les occultations se produisent de la même manière qu'à courte distance. Si c'est le cas, nous pouvons en conclure en toute sécurité que la propagation de la lumière est instantanée. Cependant, si du temps est nécessaire à une distance de trois milles, ce qui, compte tenu du trajet d'une lumière et de l'arrivée de l'autre, équivaut réellement à six milles, alors le retard devrait être facilement observable. Si l'expérience doit être réalisée à des distances encore plus grandes, disons huit ou dix milles, des télescopes peuvent être utilisés. Chaque observateur ajustera un télescope à l'endroit où il effectuera l'expérience la nuit. Bien que les lumières ne soient pas grandes et donc invisibles à l'œil nu à une si grande distance, elles peuvent facilement être occultées ou découvertes grâce aux télescopes une fois réglés et fixés, car elles deviendront facilement visibles.

Sagredo

Cette expérience me semble être une invention astucieuse et fiable. Mais permettez-moi de vous demander quelle conclusion peut être tirée des résultats.

Si ce n'est pas instantané, c'est extraordinairement rapide

Galilée
Discours et démonstrations mathématiques appartenant à
deux sciences nouvelles

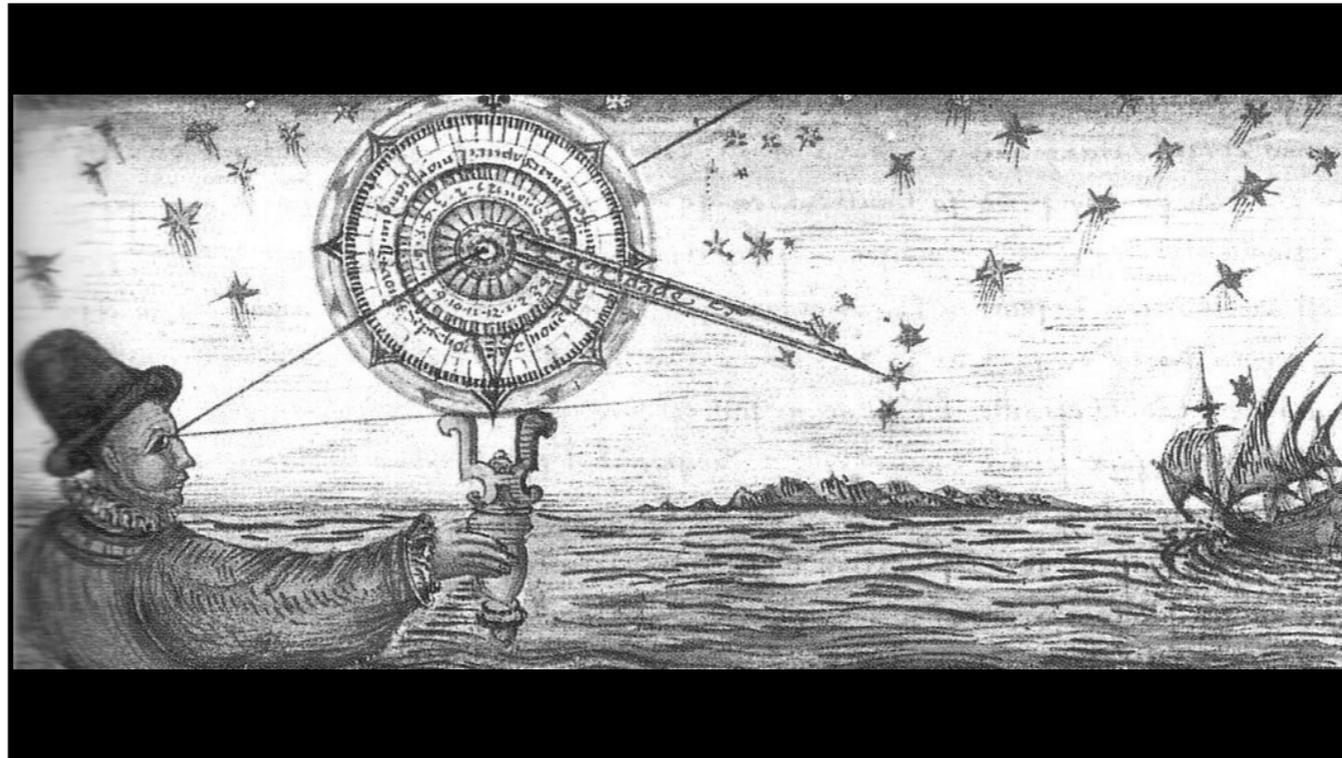
Salviati

En réalité, je n'ai réalisé cette expérience qu'à une courte distance, moins d'un mille (1.6km), et je n'ai pas été en mesure de déterminer avec certitude si l'apparition de la lumière opposée était instantanée ou non. Mais si ce n'est pas instantané, c'est extraordinairement rapide, je dirais quasi immédiate. Pour l'instant, je le comparerais à un mouvement que nous observons dans l'éclair entre des nuages situés à huit ou dix milles de nous. Nous voyons le début de cette lumière, je pourrais dire sa tête et sa source, localisée à un endroit précis parmi les nuages ; mais elle se propage immédiatement aux nuages environnants, ce qui semble indiquer qu'au moins un certain temps est nécessaire pour sa propagation. Car si l'illumination était instantanée et non progressive, nous ne pourrions pas distinguer son origine, son centre, pour ainsi dire, de ses parties périphériques. Dans quelle mer plongeons-nous progressivement sans le savoir ! Avec des vides, des infinis, des indivisibles et des mouvements instantanés, serons-nous jamais capables, même au moyen de mille discussions, d'atteindre la terre ferme ?

Donc Galilée n'obtient pas comme résultat de sa mesure une valeur de la vitesse de la lumière, mais il a établi un protocole de mesure et détermine la limite de la mesure. La vitesse étant égale à la distance que parcourt la lumière divisée par le temps que la lumière met pour parcourir cette distance. Galilée ne dispose tout simplement pas de la technologie nécessaire pour mesurer un temps aussi bref que quelques millièmes de secondes, il n'avait pas davantage les outils pour mesurer avec la précision nécessaire la distance séparant les deux collines de Florence.

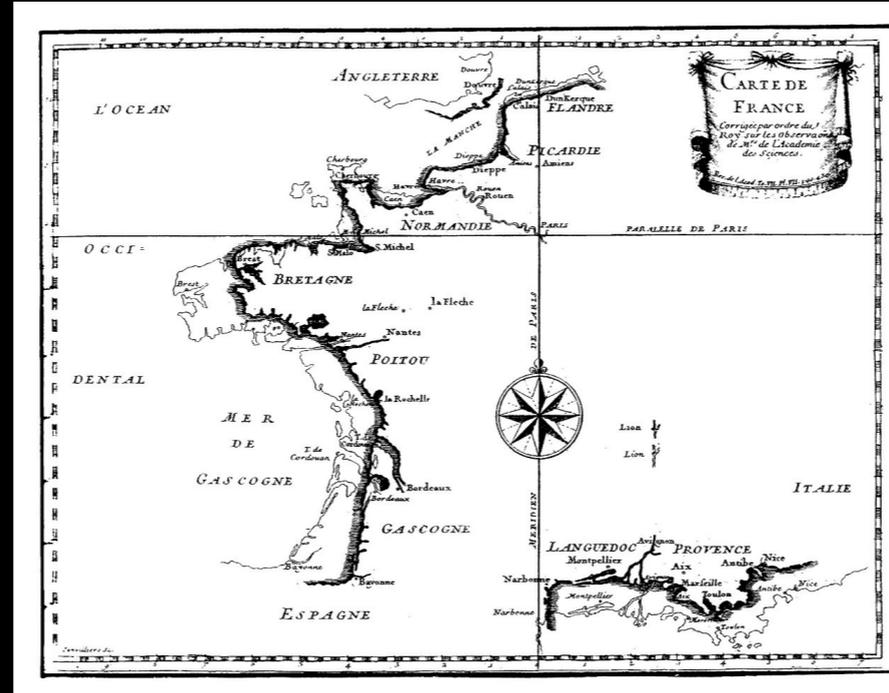
Vitesse de la lumière ...

Cette première tentative de mesurer de la vitesse de la lumière ayant échoué par manque des technologies nécessaires, peu de monde se préoccupait de savoir quelle était sa valeur précise car non seulement il n'y avait au 17^{ème} siècle aucune application pratique mettant en jeu la vitesse de la lumière mais en plus la théorie de la lumière telle qu'elle a été élaborée par Huygens ne nécessitait pas de connaître cette vitesse.

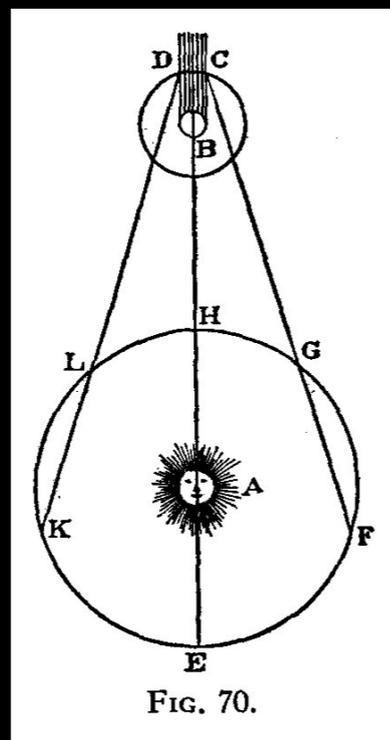


Un autre problème, bien pratique lui, préoccupait gouvernants, marchands, conquérants et navigateurs : la détermination du positionnement sur Terre et surtout en mer. Déterminer la latitude du lieu était relativement simple, en déterminer la longitude, c'est-à-dire le positionnement est-ouest, restait extrêmement problématique voire impossible sans horloge fiable.

En l'absence de solutions pratiques, dès 1598 le roi d'Espagne Philippe III avait offert un prix pour une méthode permettant de déterminer la longitude d'un navire sans terre en vue. Et c'est l'inévitable Galilée qui propose 1616 une horloge cosmique qui donne l'heure du jour, et donc la longitude, sur la base des heures des éclipses des satellites de Jupiter qu'il avait lui-même découverts quelques années auparavant. Cependant observer les éclipses depuis un navire n'est pas très pratique. Le faire sur Terre en revanche est aisé et présente un intérêt évident.



L'astronome Jean-Dominique Cassini premier directeur de l'Observatoire royal de Paris créé par Louis XIV avec la mission de faire une carte de France précise. Cassini utilisera la méthode de triangulation pour déterminer les distances et les éclipses des satellites de Jupiter pour déterminer les longitudes. Dans ce contexte, Cassini, publia une première éphéméride des éclipses des satellites de Jupiter à un endroit donné sur Terre pour en déduire la longitude du lieu. Il était aidé dans cette tâche par l'astronome Jean Picard et une jeune danois Ole Roemer qui rejoindra l'Observatoire royal.



Ole Römer

FIG. 70.

Démonstration touchant le mouvement de la lumière trouvé par M. Römer,
Journal des Sçavans, MDCLXXVI, p. 233-236 (Académie royale des sciences, 16 décembre 1676)

A Paris, Ole Roemer étudia de façon systématique l'orbite du satellite Io le plus brillant et le plus proche de Jupiter. Sur la figure, le soleil est en A au centre de l'image. Un premier cercle passant par FGHLK représente l'orbite de la Terre. La planète Jupiter est située en B en haut de l'image et le cercle passant par CD représente l'orbite de Io, C marquant, l'immersion de Io derrière Jupiter (le début de l'éclipse) et D l'émergence de Io de derrière Jupiter (la fin de l'éclipse).

Io complète son orbite autour de Jupiter en un peu plus de 42 heures (42 heures vingt-huit minutes et trente-cinq secondes) ce qui le rend assez pratique pour la détermination de la longitude en notant l'heure de son immersion et de son émergence.

A son grand étonnement, Roemer s'aperçut que Io était, à certaines époques de l'année, légèrement en avance et, à d'autres moments, légèrement en retard. Il observa que le retard augmentait pendant six mois pour atteindre jusqu'à 8 minutes, puis le retard diminuait jusqu'à se transformer, six mois plus tard, en une avance de 8 minutes.

Le phénomène correspond donc à un cycle qui s'étend sur un période d'une année mais surtout ce cycle est synchrone avec l'éloignement et le rapprochement de la Terre par rapport à Jupiter. Le moment où Io était le plus en retard correspondait exactement au moment où la Terre était le plus éloignée de Jupiter. Et inversement, lorsque Io était le plus en avance, cela correspondait au moment où la Terre était le plus près de Jupiter.

Roemer n'avait aucune raison à penser que l'orbite de Io puisse présenter une quelconque irrégularité. Il interpréta ce phénomène comme une manifestation de la vitesse finie de la lumière. Lorsqu'un observateur sur Terre voit l'émergence de Io, la Terre se trouvant, par exemple, à ce moment en L sur son orbite, il observera l'émergence suivante alors que la Terre aura parcourue une certaine distance pour se retrouver en K sur son orbite. Par rapport à l'observation de la première émergence, la lumière de Io pour parvenir à l'observateur terrestre devra parcourir une distance supplémentaire égale à la longueur du segment KL. Le temps nécessaire pour que la lumière parcoure cette distance explique le retard observé du temps de l'émergence de Io. Le même raisonnement explique l'avance que prend le temps d'immersion, lorsque la Terre parcourt la distance FG sur son orbite.

10 à 11 minutes du Soleil à la Terre

Démonstration touchant le mouvement de la lumière trouvé par M. Römer,
Journal des Sçavans, MDCLXXVI, p. 233-236 (Académie royale des sciences, 16 décembre 1676)

Le compte rendu de la communication que Roemer fit à l'Académie royale des sciences de sa découverte a été rapporté par le tout premier journal scientifique, le Journal des Savants, en décembre 1676. Ce compte rendu ne fait pas état de la mesure, ou plutôt du calcul, que Roemer fit de la vitesse de la lumière. Mais d'après les notes de ses nombreuses observations (trente observations d'éclipses), on peut dire que Roemer estimait à environ 11 minutes le temps que mettrait la lumière pour parcourir une distance égale au rayon de l'orbite de la Terre autour du soleil. Avec la valeur connue aujourd'hui de la distance moyenne Terre-Soleil, ceci nous donne une vitesse de la lumière égale à environ 220.000 km/s

Bien qu'accueillie avec un certain enthousiasme dans la communauté scientifique (Newton, Fresnel, Huygens), son interprétation rencontra du scepticisme, notamment auprès de son patron à l'observatoire de Paris, Cassini. Sa principale objection étant, que les autres satellites de Jupiter ne paraissaient pas suivre le même phénomène que Io (il est vrai que la mise en évidence de l'effet est alors difficile car le mouvement des satellites est très complexe en raison de leurs interactions mutuelles).

1678

Christian Huygens, Traité de la Lumière



Dans son Traité de la Lumière publié en 1678 où il expose la théorie ondulatoire de la lumière, le mathématicien astronome néerlandais, Christian Huygens, reprend l'idée de Römer et fait le calcul : « .. et l'on en a conclu que pour traverser tout le diamètre de l'orbe annuel, qui est le double de la distance d'ici au soleil = (22000 diamètres de la Terre), la lumière a besoin d'environ 22 minutes de temps »

La lumière met 22 minutes pour traverser le diamètre de l'orbite de la Terre

Onze cent fois cent mille toises par battement d'artère

En suivant au plus près le texte de Huygens, « **la lumière met donc 22 minutes pour parcourir 22000 diamètres de la Terre, soit mille diamètres en une minute et 16 diamètres 2/3 en un battement d'artère, ce qui fait onze cent fois cent mille toises, puisque le diamètre de la Terre contient 2864 lieues de 25 au degré, que chaque lieue est de 2232 toises....** »

D'où l'intérêt du système métrique : D'après les calculs de Huygens et les observations de Roemer la vitesse de la lumière est alors de 212.000 km/s. La différence d'avec la valeur connue actuellement est due à la mauvaise connaissance de la distance Terre-Soleil. Ainsi pour la première fois il est démontré par la mesure que la vitesse de la lumière est finie mais la connaissance de sa valeur exacte reste sujette de la connaissance de la distance qui sépare la Terre du Soleil.

James Bradley, L'aberration stellaire

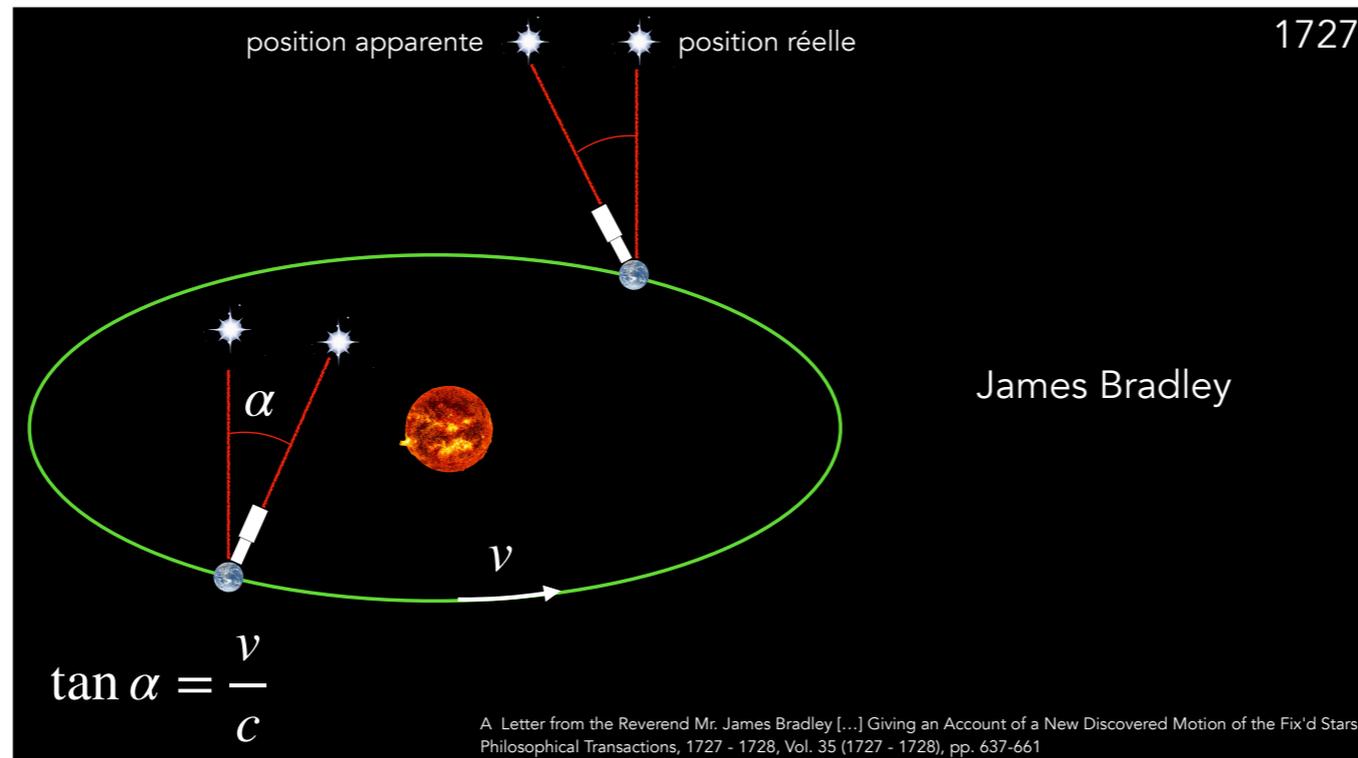
A Letter from the Reverend Mr. James Bradley [...] Giving an Account of a New Discovered Motion of the Fix'd Stars.
Philosophical Transactions, 1727 - 1728, Vol. 35 (1727 - 1728), pp. 637-661

Ce qui finit par définitivement convaincre la communauté scientifique de la finitude de la vitesse de la lumière est l'observation en 1725 par l'astronome britannique James Bradley, directeur de l'observatoire de Greenwich, de l'aberration stellaire et de l'interprétation qu'il en fit.

Pour comprendre ce phénomène, considérons l'analogie du marcheur sous la pluie. Lorsque la pluie tombe par une journée sans vent verticalement et que vous restez immobile protégé par votre parapluie tenu bien droit au-dessus de vous, vous resterez au sec. En revanche si vous vous mettez à courir pour attraper le tram, tout en gardant le parapluie dans la même position, vous prendrez la pluie en pleine figure, car dans votre système de référence la pluie a maintenant une vitesse horizontale opposée à la vitesse à laquelle vous courez. Il faudra donc incliner le parapluie du même angle que la pluie pour rester au sec, ou à peu près au sec.

Les chasseurs préféreront peut-être l'analogie de la technique du tir au canard : il ne faut pas tirer dans la direction du canard, mais légèrement à l'avant dans le sens du vol du canard pour tenir compte de la vitesse finie de la balle du fusil.

Le même phénomène se rencontre lors d'observation des étoiles dites fixes : du fait de la vitesse de la Terre sur son orbite et de la vitesse finie de la lumière, il faudra incliner le télescope d'un certain angle dont la tangente est égale au rapport de la vitesse de la Terre sur son orbite et de la vitesse de la lumière. D'où une méthode de mesure de la vitesse de la lumière, observer la position apparente de plusieurs étoiles pendant une année. Cette position décrit une ellipse dont vous déduisez l'angle alpha et, connaissant la vitesse de la Terre sur son orbite 30 km/s, la vitesse de la lumière.



Ce qui finit par définitivement convaincre la communauté scientifique de la finitude de la vitesse de la lumière est l'observation en 1725 par l'astronome britannique James Bradley, directeur de l'observatoire de Greenwich, de l'aberration stellaire et de l'interprétation qu'il en fit.

Pour comprendre ce phénomène, considérons l'analogie du marcheur sous la pluie. Lorsque la pluie tombe par une journée sans vent verticalement et que vous restez immobile protégé par votre parapluie tenu bien droit au-dessus de vous, vous resterez au sec. En revanche si vous vous mettez à courir pour attraper le tram, tout en gardant le parapluie dans la même position, vous prendrez la pluie en pleine figure, car dans votre système de référence la pluie a maintenant une vitesse horizontale opposée à la vitesse à laquelle vous courez. Il faudra donc incliner le parapluie du même angle que la pluie pour rester au sec, ou à peu près au sec.

Les chasseurs préféreront peut-être l'analogie de la technique du tir au canard : il ne faut pas tirer dans la direction du canard, mais légèrement à l'avant dans le sens du vol du canard pour tenir compte de la vitesse finie de la balle du fusil.

Le même phénomène se rencontre lors d'observation des étoiles dites fixes : du fait de la vitesse de la Terre sur son orbite et de la vitesse finie de la lumière, il faudra incliner le télescope d'un certain angle dont la tangente est égale au rapport de la vitesse de la Terre sur son orbite et de la vitesse de la lumière. D'où une méthode de mesure de la vitesse de la lumière, observer la position apparente de plusieurs étoiles pendant une année. Cette position décrit une ellipse dont vous déduisez l'angle alpha et, connaissant la vitesse de la Terre sur son orbite 30 km/s, la vitesse de la lumière.

Light moves or is propagated as far as from the Sun to the
Earth in **8'12"**

A Letter from the Reverend Mr. James Bradley [...] Giving an Account of a New Discovered Motion of the Fix'd Stars.
Philosophical Transactions, 1727 - 1728, Vol. 35 (1727 - 1728), pp. 637-661

En répétant cette mesure pour plusieurs étoiles, il obtient toujours la même valeur pour l'angle alpha (20 secondes d'arc) et il en déduit que la lumière va 10.210 fois plus vite que la Terre sur son orbite, c'est-à-dire que la lumière met 8 minutes et 12 secondes pour parcourir la distance séparant la Terre du Soleil. Ce qui est la valeur mesurée actuellement, mais la vitesse de la lumière dépend toujours de la connaissance de la distance Terre-Soleil.

1810

François Arago

Mémoire sur la vitesse de la lumière

Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 36 (1853): 38-49



En 1810 dans son mémoire original, publié seulement 40 ans plus tard dans les Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences sous le titre « Mémoire sur la vitesse de la lumière, lu à la première Classe de l'Institut le 10 décembre 1810 », François Arago présente et discute ses nombreuses mesures d'aberration stellaire qui lui permettent de déterminer avec une précision meilleure que celle obtenue précédemment par James Bradley

$$c = 308.303 \text{ km/s}$$

François Arago
Mémoire sur la vitesse de la lumière
Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 36 (1853): 38-49

la vitesse de la lumière égale à 308.300 km/s avec une erreur de quelques centaines de km/s.

Après cette dernière estimation de la vitesse de la lumière à partir d'observations astronomiques, les physiciens vont retourner sur Terre pour de nouvelles mesures dont la précision ne cessera de s'améliorer, jusqu'en 1983 date à partir de laquelle déterminer la vitesse de la lumière n'aura plus aucun sens.

1849

Hippolyte Fizeau

Sur une expérience relative à la vitesse de propagation de la lumière
Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 29 (1849): 90-92

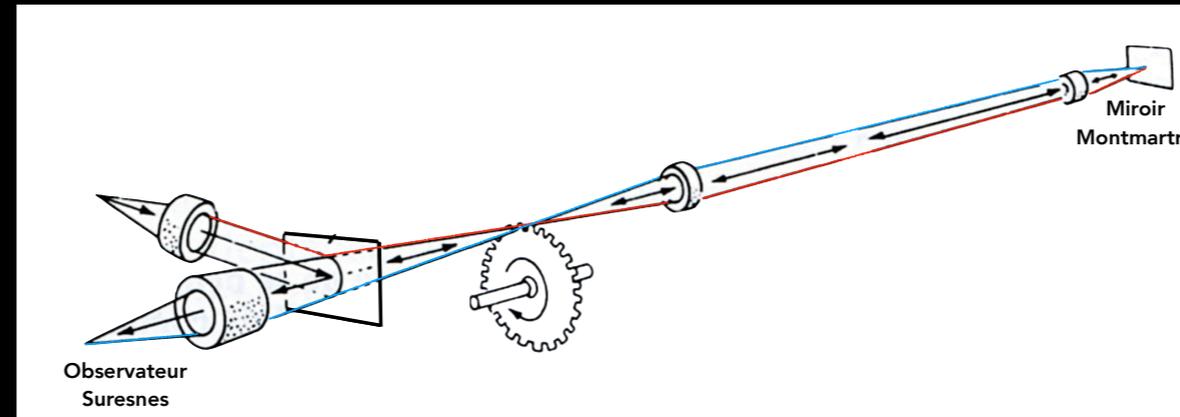


C'est le physicien français, Hippolyte Fizeau, qui fut le premier à répéter l'expérience de Galilée avec la technologie de 1849 pour mesurer des temps très brefs. C'est lui qui a découvert le décalage de fréquence d'une onde lorsque la source et le récepteur sont en mouvement l'un par rapport à l'autre (effet Doppler-Fizeau). C'est ainsi qu'il prédit le décalage vers le rouge des ondes lumineuses pour des sources s'éloignant de l'observateur, phénomène exploité entre autres par Edwin Hubble pour établir en 1929 la loi Hubble-Lemaître (voir cours 2022) décrivant l'éloignement des galaxies et à l'origine du modèle cosmologique du Big Bang.

Fizeau est surtout connu pour ses expériences de mesure de la vitesse de la lumière réalisées en 1849.

Je vous le rappelle pour mesurer la vitesse de la lumière il faut mesurer la distance sur laquelle la lumière se propage et le temps que met la lumière pour se propager le long de cette distance. Ces deux mesures doivent être les plus précises possibles.

1849



Hippolyte Fizeau
 Sur une expérience relative à la vitesse de propagation de la lumière
 Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 29 (1849): 90-92

Fizeau réalise son expérience entre la maison de villégiature de son père à Suresnes et l'appartement d'un ami à Montmartre. La distance de 8633m séparant les deux endroits est établie de façon précise par triangulation. Il s'agit donc de mesurer un temps de l'ordre d'une cinquantaine de micro secondes. Pour cela, il avait mis au point (avec Gustave Froment, réalisateur d'instruments scientifiques) un système de roue dentée en rotation rapide : 720 dents sur une couronne de 12 cm de diamètre, un remarquable travail d'usinage de précision.

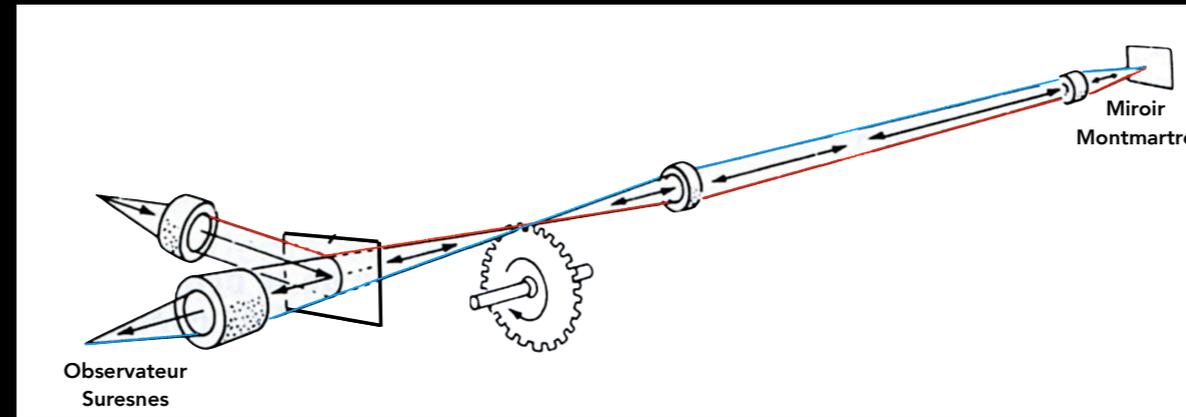
Le principe est le suivant : La lumière traverse un miroir semi-transparent incliné à 45°. Elle passe à travers la roue dentée, entre deux dents, puis se dirige vers la butte Montmartre. De là, la lumière est réfléchiée par un miroir et retourne à Suresnes où elle passe à nouveau à travers la roue dentée, par la même échancrure avant d'être réfléchiée pour pouvoir être observée par Fizeau.

Lorsque la roue tourne très lentement, Fizeau observe la lumière qui apparaît et disparaît en alternance, selon que les dents font obstacle ou non au passage du faisceau lumineux.

Lorsque la roue dépasse les 12 tours par seconde, Fizeau observe qu'à exactement 12,6 tours par seconde, la lumière qui revient de Suresnes est bloquée par la dent qui suit l'échancrure de la roue par laquelle est passée la lumière pour se rendre à Montmartre.

En reliant la vitesse de rotation de la roue à la distance parcourue par la lumière (un aller-retour Suresnes-Montmartre), Fizeau peut déterminer le temps que met la lumière à parcourir ce trajet. Il suffit de diviser la distance du trajet par le temps mesuré pour obtenir la vitesse de la lumière.

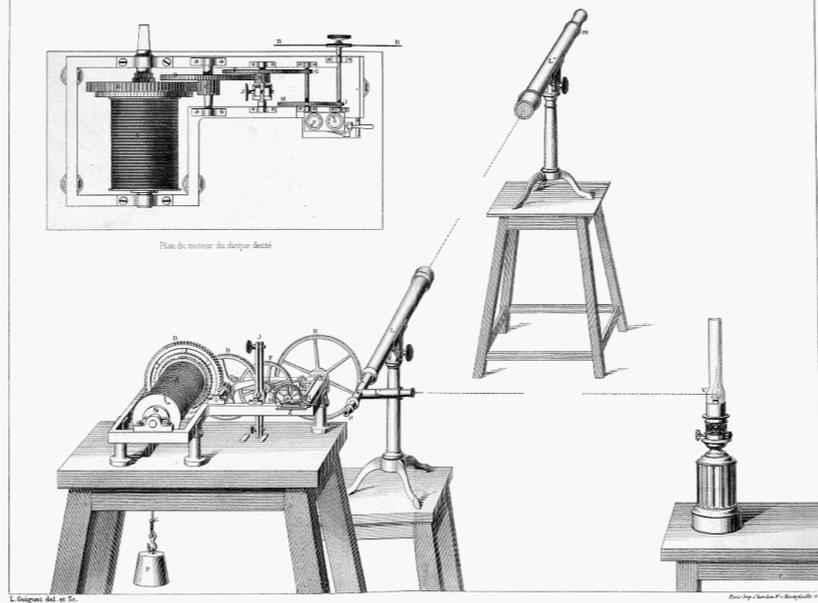
1849



$$c = 4 \times d \times f \times N_{\text{dents}}$$

Hippolyte Fizeau
Sur une expérience relative à la vitesse de propagation de la lumière
Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 29 (1849): 90-92

La formule est la suivante $c=4 \times d \times f \times N_{\text{dents}}$ où d est la distance connue entre Suresnes et Montmartre, f la fréquence de rotation mesurée de la roue et N le nombre de dents ou de creux connu sur la roue ($N=720$ dents/creux, $f = 12,06$ tours par seconde, $d = 8633\text{km}$ donne la valeur actuelle de $c=299792,458$ km/s)



Plan du moteur du disque denté

L. Guignard del. et sc.

Paris, Imp. de la Bibliothèque N^o 11

Fig. 330. Appareil de M Fizeau pour la mesure de la vitesse de la lumière par des observations faites sur la terre à de courtes distances.

<https://portail.polytechnique.edu/musx/fr/collections/objets-phares/appareil-de-fizeau>

$$c = 315.350 \pm 2500 \text{ km/s}$$

Hippolyte Fizeau
Sur une expérience relative à la vitesse de propagation de la lumière
Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 29 (1849): 90-92

La valeur moyenne obtenue pour 28 observations est de « 70 948 lieues de 25 au degré » (la lieue terrestre ou lieue commune de France vaut 1/25 de degré du périmètre terrestre, soit exactement 4,444 8 km), soit 315 350 kilomètres par seconde avec une marge d'erreur de 0.6% soit de l'ordre de 2500km/s. Son résultat est toutefois moins bon que les résultats obtenus avec les méthodes astronomiques mais il aura l'énorme mérite d'avoir démontré que l'expérience de Galilée est réalisable à condition de savoir mesurer avec une bonne précision des temps très courts. La plus grande source d'erreur dans l'expérience de Fizeau a été la mesure de la vitesse de rotation de la roue dentée.

La méthode terrestre aura l'énorme mérite de ne plus avoir besoin de recourir à des données astronomiques, telle la distance Terre-Soleil.

Les astronomes profiteront de cette opportunité pour retourner le problème c'est-à-dire utiliser la vitesse de la lumière déterminée en laboratoire pour faire les calculs astronomiques. C'est ainsi qu'Urbain Le Verrier, le découvreur de la planète Neptune par la seule vertu du calcul, avait pu déduire en 1861, toujours par le calcul, une valeur de la distance moyenne de la Terre au Soleil, égale à 147 millions de kilomètres, inférieur à la valeur alors couramment admise de 153,5 millions de km ; Pour vérifier son calcul, Le Verrier avait ainsi besoin de connaître la vitesse de la lumière pour déterminer la distance Terre-Soleil à partir de la constante de l'aberration (voir James Bradley).

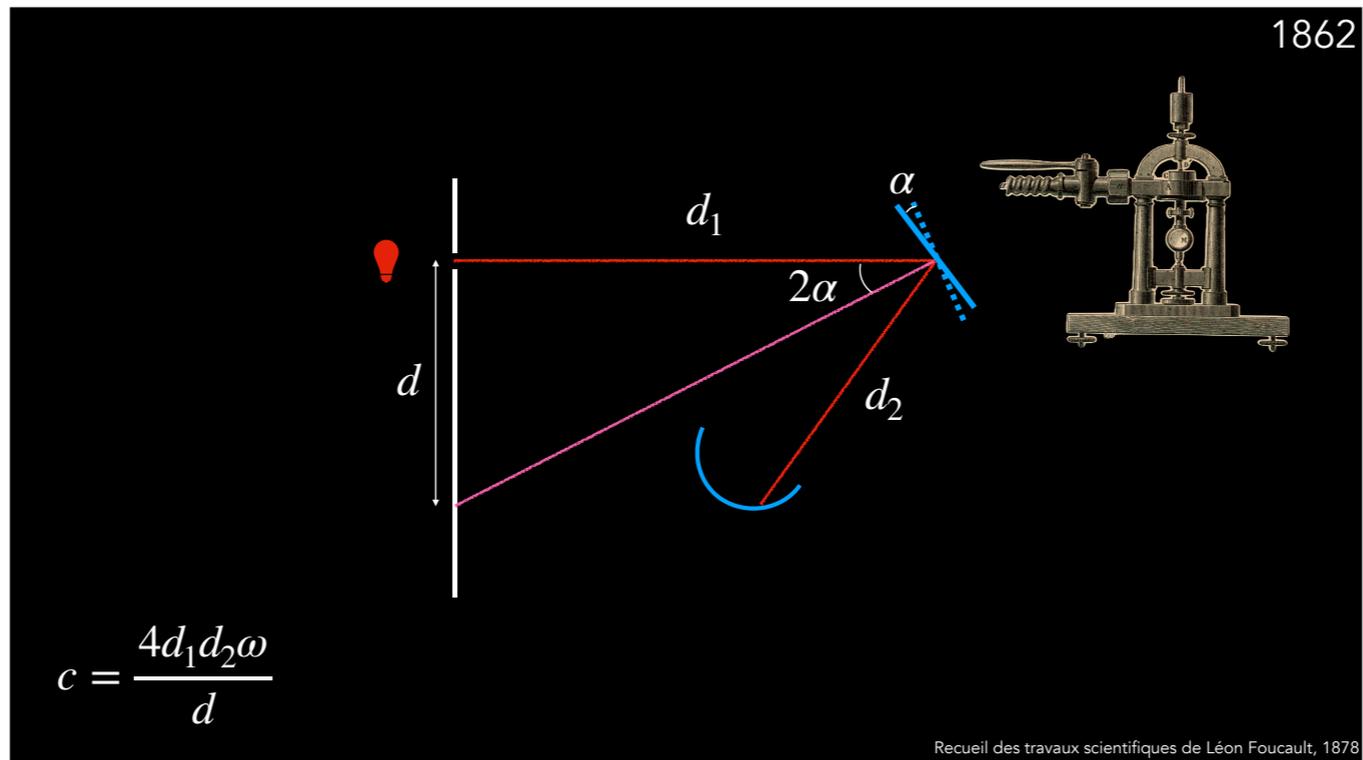
Le Verrier, qui dirigeait l'Observatoire de Paris, demanda donc à Léon Foucault, physicien du même Observatoire, de mesurer la vitesse de la lumière avec la plus grande précision possible.

1862

Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault, 1878



Leon Foucault connu par ailleurs pour plusieurs inventions qui portent son nom (pendule de Foucault, courant de Foucault, gyroscope de Foucault) s'attela à la tâche aidé par l'instrumentaliste, Gustave Froment, qui avait réalisé auparavant la roue dentée de Fizeau.



Il va utiliser la technique du miroir tournant dont le principe est le suivant. La lumière tombe sur un miroir tournant (400 tours par seconde) en suivant le chemin d_1 . A l'aide d'autres miroirs (qui ne figurent pas sur le schéma) on lui fait faire un trajet assez long d_2 (de l'ordre de 40m) avant qu'il ne retourne sur le miroir tournant. Pendant l'aller retour d_2 , le miroir a tourné d'un angle α et la lumière est déviée par rapport à la direction d_1 d'un angle $2 \times \alpha$. On observe l'impact de la lumière sur l'écran à une distance d de la source lumineuse. Connaissant d_1 et d_2 par construction, la mesure de d permet de déterminer l'angle alpha et de là la vitesse de la lumière, omega étant la vitesse de rotation du miroir.

1862

$$c = 298.000 \pm 500 \text{ km/s}$$

Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault, 1878

Foucault détermine la vitesse de la lumière égale à 298000 km/s avec une marge d'erreur de 500 km/s (soit 0.16%) ce qui n'est pas mal. Du moins satisfaisant pour Le Verrier qui en déduit une distance Terre-Soleil égale à 148,5 millions de km, soit une valeur très proche de celle qu'il avait estimé (147 millions de km).

1935

Albert Michelson et al.,
Measurement of the velocity of light in a partial vacuum
Astrophysical Journal 82, 16, 1935



Il faudra attendre près de 70 ans avant qu'une mesure plus précise soit réalisée. Albert Michelson était alors instructeur en physique-chimie à l'Ecole Navale d'Annapolis aux Etats-Unis, et son supérieur lui demanda d'organiser en TP une mesure de la vitesse de la lumière en suivant le protocole de Foucault. Michelson réalisa qu'il pouvait grandement améliorer le dispositif expérimental pour obtenir une bien meilleure précision de la mesure. Pour financer son appareillage, l'école n'ayant pas le budget nécessaire, il sollicita son beau-père un homme d'affaire aisé, et c'est ainsi qu'en 1875, le jeune Michelson, alors âgé de 23 ans, améliora d'un facteur 20 la mesure de Foucault, résultat publié dans le New-York Times.

Il ne s'arrêta pas là et disposant cette fois-ci de moyens bien plus conséquents il réalisa de nouvelles mesures en Californie, d'abord en 1927 sur une distance de 2 fois 35 km entre le Mont Wilson (là où Hubble observa la vitesse d'éloignement des galaxies) et le Mont Baldy.

Puis en 1935, toujours à l'aide du système du miroir tournant, son équipe réalisa une nouvelle mesure cette fois-ci dans une vallée du sud de la Californie, où il fit faire à la lumière 10 fois le trajet dans un tube sous vide long de 1.6km.

Figure 8 resembles a probability-curve and indicates that the probable value of a constant velocity would be 299,774 km/sec.

TABLE VIII
FREQUENCY DISTRIBUTION OF MEASURED VELOCITIES

Velocity Range	Number	Velocity Range	Number
299000+		299000+	
726-731	4	776-780	515
731-735	6.5	781-785	270
736-740	3.0	786-790	236
741-745	55	791-795	90
746-750	29	796-800	62
751-755	86	801-805	33
756-760	184	806-810	30
761-765	304	811-815	32.5
766-770	353.5	816-820	0
771-775	580	821-825	12

Time-velocity curves.—A plot of velocity readings with respect to time is shown in Figure 9, the abscissae representing days of the year and the ordinates velocity. Four periods of the night are distinguished by the characters shown in the legend. The heavy line

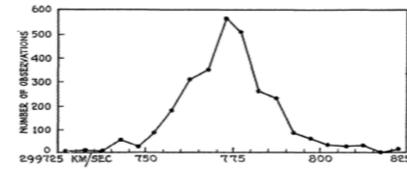


FIG. 8.—Velocity distribution-curve

jo
a f
va

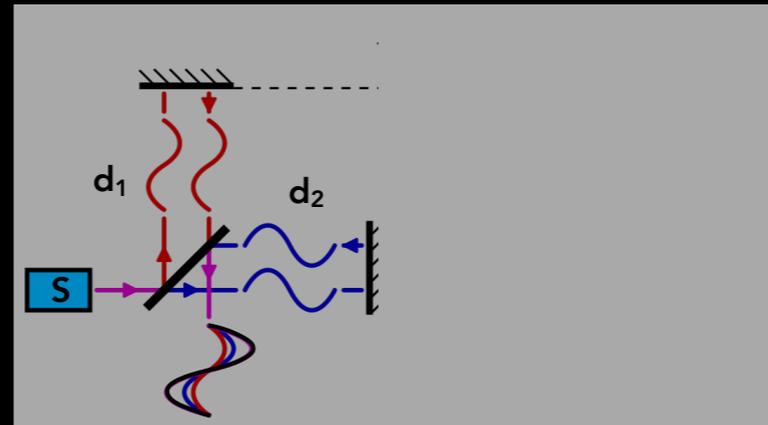
$$c = 299.774 \pm 11 \text{ km/s}$$

All the 1931 observations lie close to the axis with the exception of series 14-25, whose mean is 299,746 km/sec. The 1932 curve begins at 299,800 km/sec., suddenly drops to 299,776 km/sec., con-

Albert Michelson et al.,
Measurement of the velocity of light in a partial vacuum
Astrophysical Journal 82, 16, 1935

La valeur de la vitesse de la lumière est alors connue à 11 km/s près, soit une erreur de 0.04 pour mille.

Malgré cette belle performance, il est possible de faire mieux encore.

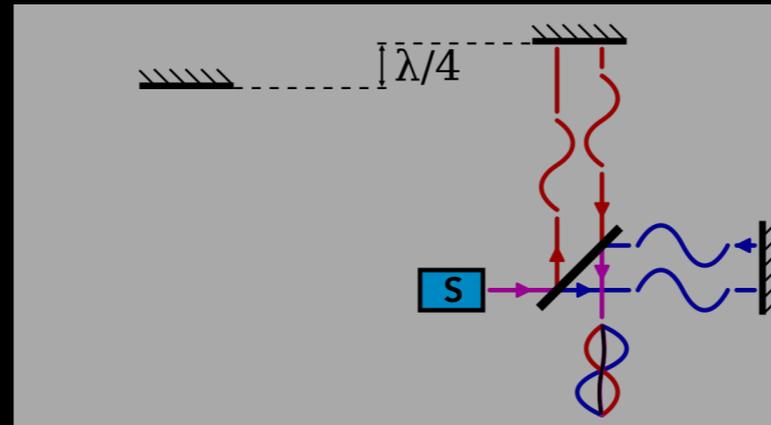


K.M. Evenson et al., Measurement of light from direct frequency and wavelength measurements of the methane-stabilized laser, *Phy. Rev. Lett.* 29, 1346 (1972)

De nos jours on utilise les techniques d'interférences associées à des faisceaux lasers de fréquence stabilisée par des horloges atomiques. La technique de mesure est schématiquement la suivante.

Le faisceau laser issu de la source S est en partie réfléchi vers le haut (rouge), en partie transmis (bleu) à travers le miroir semi-transparent. La partie rouge est ensuite réfléchi vers le bas par un miroir horizontal et la partie bleue est réfléchi par le miroir vertical. Les deux ondes rouge et bleue se superposent (interfèrent). En choisissant les distances d_1 et d_2 égales, l'interférence sera constructive et on obtiendra la courbe rose.

1972



K.M. Evenson et al., Measurement of light from direct frequency and wavelength measurements of the methane-stabilized laser, *Phy. Rev. Lett.* 29, 1346 (1972)

Si maintenant vous déplacez le miroir du haut d'une distance égale au quart de la longueur d'onde du laser sans bouger le miroir horizontal, les parties rouge et bleue seront décalées d'une demi longueur d'onde et formeront une interférence destructive. L'observateur ne verra plus la lumière laser.
Donc, en ajustant le déplacement du miroir du haut (de quelques millièmes de m) tout en observant les motifs d'interférence, on peut déterminer la longueur d'onde λ de la lumière et de là déduire la vitesse de la lumière connaissant très précisément la fréquence f du laser : $c = f \times \lambda$

1972

$$c = 299.792.456,2 \pm 1.1 \text{ m/s}$$

K.M. Evenson et al., Measurement of light from direct frequency and wavelength measurements of the methane-stabilized laser, *Phy. Rev. Lett.* 29, 1346 (1972)

Nous connaissons ainsi la vitesse de la lumière au mètre par seconde près, ce qui va nous permettre de changer le statut de c et en faire une constante universelle. Mais avant d'y arriver il faut encore vérifier une dernière chose : est-ce-que la vitesse de la lumière est invariante, c'est-à-dire est-ce-que que tout observateur quelque soit son mouvement par rapport à la source de lumière mesurera toujours la même valeur de c ?

1865

J. Clerk Maxwell

A dynamical theory of the electromagnetic field

Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 155, Issue 155 (1865)



Avant de répondre à cette question, il va falloir faire un petit retour en arrière, remonter le temps jusqu'en 1865 lorsque Maxwell propose sa théorie de l'électromagnétisme.

Je vous avais parlé avec certains détails de ce qu'étaient les équations de Maxwell avec lesquelles Maxwell réussit le tour de force d'unifier toutes les phénomènes de l'électricité et du magnétisme en un unique phénomène sous-jacent (l'interaction entre le champ électrique, le champ magnétique et l'onde électromagnétique) que l'on peut résumer en quelques équations : l'électromagnétisme. Ce qui est particulièrement remarquable et ce que Einstein considèrera plus tard comme une découverte géniale, est l'intuition de Maxwell que la lumière puisse être interprétée comme un processus électromagnétique.

Il trouve en effet qu'une perturbation du champ électromagnétique se propage dans l'espace et le temps comme une onde, une onde électromagnétique. Comme une perturbation locale dans une mare (jet d'un pavé) se propage sur toute la mare comme une onde, c'est-à-dire une succession de vaguelettes, à une vitesse plus ou moins rapide dépendant des propriétés de l'eau de la mare.

ϵ_0 : permittivité électrique du vide

μ_0 : perméabilité magnétique du vide

J. Clerk Maxwell
A dynamical theory of the electromagnetic field
Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 155, Issue 155 (1865)

L'onde électromagnétique, se propage dans l'espace, dont deux constantes caractéristiques la permittivité électrique du vide notée ϵ_0 (qui décrit la capacité d'un matériel à emmagasiner un champ électrique, elle apparaît dans la loi de Coulomb -> force entre deux charges électriques) et μ_0 la perméabilité magnétique du vide (qui caractérise la faculté d'un matériau à emmagasiner un champ magnétique, elle apparaît dans le théorème d'Ampère -> champ magnétique créé par courant électrique) empêche l'onde électromagnétique de se propager instantanément. Ces deux constantes, d'une certaine façon, déterminent à quelle vitesse une onde électromagnétique traverse l'espace. La relation exacte entre ces deux constantes et la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique est la suivante :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

J. Clerk Maxwell
A dynamical theory of the electromagnetic field
Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 155, Issue 155 (1865)

1865

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 310.740.000 \text{ m/s}$$

J. Clerk Maxwell
A dynamical theory of the electromagnetic field
Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 155, Issue 155 (1865)

Ces deux constantes peuvent être déterminées assez aisément en mesurant soit l'inductance d'une bobine pour μ_0 , soit la capacitance d'un condensateur ϵ_0 . Maxwell cite de telles mesures réalisées en 1857 par deux allemands (Weber et Kohlrausch, Leipzig Transactions, vol. v. (1857), p. 260) et calcule la vitesse d'une onde électromagnétique.

Il calcule ainsi la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique pour trouver la valeur de 310.740 km/s.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 310.740.000 \text{ m/s}$$

J. Clerk Maxwell
A dynamical theory of the electromagnetic field
Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 155, Issue 155 (1865)

Il conclut : *L'accord de ce résultat avec les mesures de la lumière de Fizeau et de Foucault semble indiquer que la lumière et le magnétisme sont des modifications de la même substance et que la lumière est une perturbation électromagnétique se propageant suivant les lois de l'électromagnétisme.*

Il note, non sans malice, que la seule utilité de la lumière dans cette expérience était de pouvoir voir les instruments. Donc une mesure de la vitesse de la lumière, sans faire intervenir la lumière.

Aujourd'hui la terminologie adoptée est la constante diélectrique pour ϵ_0 et la constante magnétique pour μ_0 . Leur valeur a été fixée à $\epsilon_0 = 8,854\ 187\ 82 \times 10^{-12}$ Farad par mètre et $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Tesla mètre par ampère.

1907

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 299.710 \pm 10 \text{ km/s}$$

E. B. Rosa and N. E. Dorsey,
A new determination of the ratio of the electromagnetic to the electrostatic unit of electricity,
Bulletin of the Bureau of Standards vol 3 N°3, 4

En 1907, reprenant la méthode proposée par Maxwell pour mesurer la vitesse de propagation d'une perturbation électromagnétique, c'est-à-dire de l'onde électromagnétique, une équipe du National Bureau of Standards américain, dont le mandat est de définir les unités standards de poids et de mesure, parvient à calculer avec une précision inédite la vitesse de la lumière ... sans faire intervenir la lumière dans le protocole de mesure si ce n'est pour éclairer le laboratoire où sont réalisées les mesures.

En 1907 la vitesse de la lumière est donc connue à 10km/s près: comme nous l'avons vu, il faudra attendre près de 30 ans, pour que l'équipe de Michelson arrive à une mesure avec la même précision en utilisant la méthode de mesure « classique » à la Galilée.

Ether luminifère

Maxwell a ainsi validé la théorie ondulatoire de lumière élaborée par Huygens mais il a surtout eu l'intuition d'identifier la lumière à un cas particulier d'onde électromagnétique, ce qui sera confirmé plus tard par Hertz. Restait à résoudre le problème du mystérieux éther luminifère.

Les physiciens ne pouvaient concevoir qu'une onde puisse se propager sans support de vibration. Ainsi, comme le son dans l'air ou les ondes à la surface d'un milieu liquide, la lumière devait se propager dans un fluide, l'éther luminifère. Puisque nous voyons les étoiles, leur lumière pour nous parvenir doit se propager dans l'éther et du coup l'éther était censé remplir le vide de l'univers. L'éther est donc nécessaire comme « substance » support de la vibration du champ électromagnétique.

Henri Poincaré dans la Science et l'hypothèse en 1902 : « On sait d'où nous vient la croyance à l'éther. Si la lumière nous arrive d'une étoile éloignée, pendant plusieurs années, elle n'est plus sur l'étoile et elle n'est pas encore sur la terre, il faut bien qu'elle soit quelque part et soutenue, pour ainsi dire, par quelque support matériel. [...] Cela ne nous obligerait encore qu'à remplir, avec l'éther le vide interplanétaire, mais non de le faire pénétrer au sein des milieux matériels eux-mêmes. L'expérience de Fizeau va plus loin. Par l'interférence des rayons qui ont traversé de l'air et de l'eau en mouvement, elle semble nous montrer deux milieux différents se pénétrant et pourtant se déplaçant l'un par rapport à l'autre. On croit toucher l'éther du doigt».

Là où les choses se compliquent, ce sont les étranges propriétés qu'il faut lui attribuer : il lui faut à la fois être très rigide pour ne pas atténuer l'onde lumineuse qui nous parvient d'étoiles situées à plusieurs années-lumière, mais en même temps il ne doit offrir aucune résistance aux objets célestes (sinon comment expliquer que la Terre tourne autour du Soleil depuis quelques milliards d'années sans être ralentie).

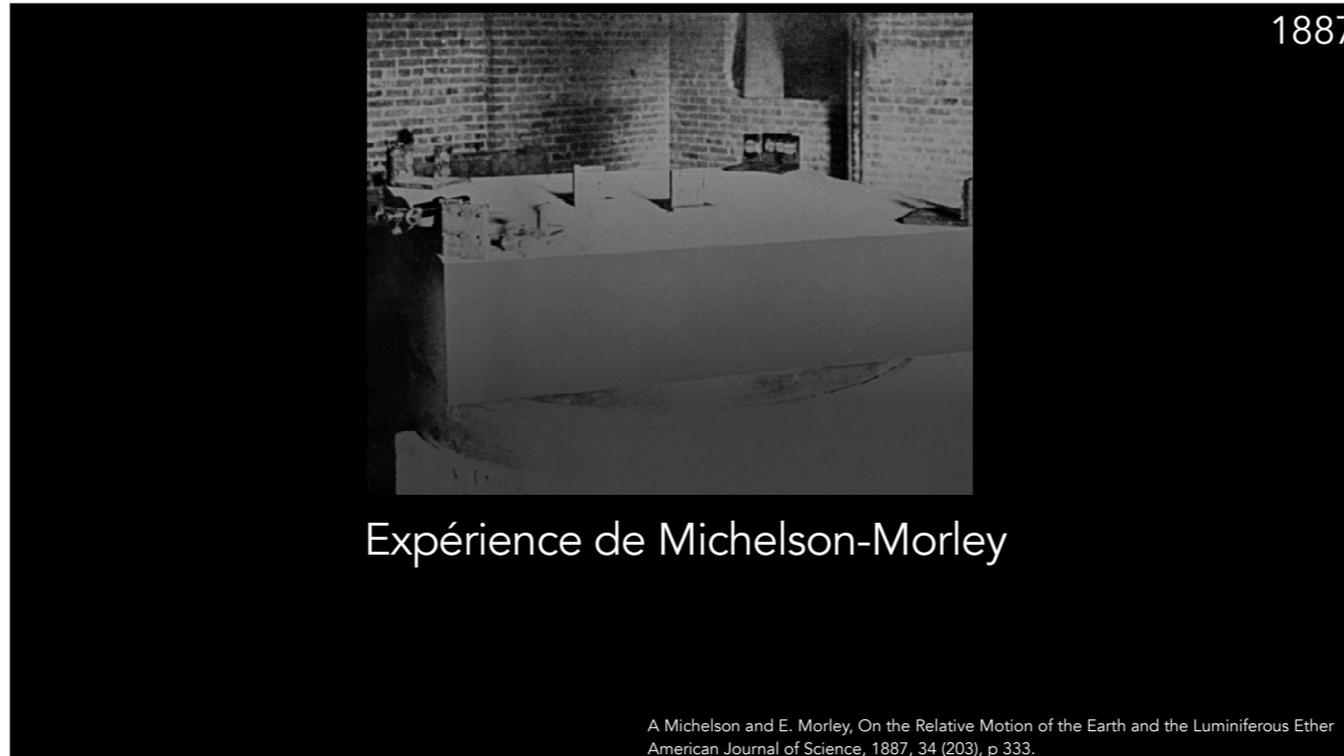
Donc cet éther invisible, rigide et transparent, répandu partout dans l'Univers doit en plus être isotrope (identique à lui-même en tout endroit) et absolument immobile. Et selon Maxwell, la vitesse de la lumière doit être fixe par rapport à l'éther : la lumière se propage dans l'éther avec une vitesse fixe. Mais qu'advient-il de cette vitesse lorsqu'elle est mesurée par un observateur Terrien, sachant la Terre se déplace à une certaine vitesse dans l'éther ?

Vitesse de la Terre dans l'éther ?

Rappelez-vous du principe de relativité de Galilée qui dans une version modernisée s'énonce ainsi : Le chef de gare immobile sur le quai voit passer un voyageur assis à la vitesse du train. Si le voyageur est en déplacement pour se rendre à l'avant du train vers le wagon bar, le chef de gare verra passer le voyageur à la vitesse du train plus la vitesse de marche du voyageur. Si le wagon bar se trouve à l'arrière du train, le voyageur se déplacera en sens inverse de celui du train, et le chef de gare verra le voyageur passer à la vitesse du train moins la vitesse de marche du voyageur.

Ce principe appliqué à la lumière, l'éther et la Terre, devrait donc permettre de déterminer la vitesse de la Terre par rapport à l'éther en mesurant les changements de la vitesse de la lumière.

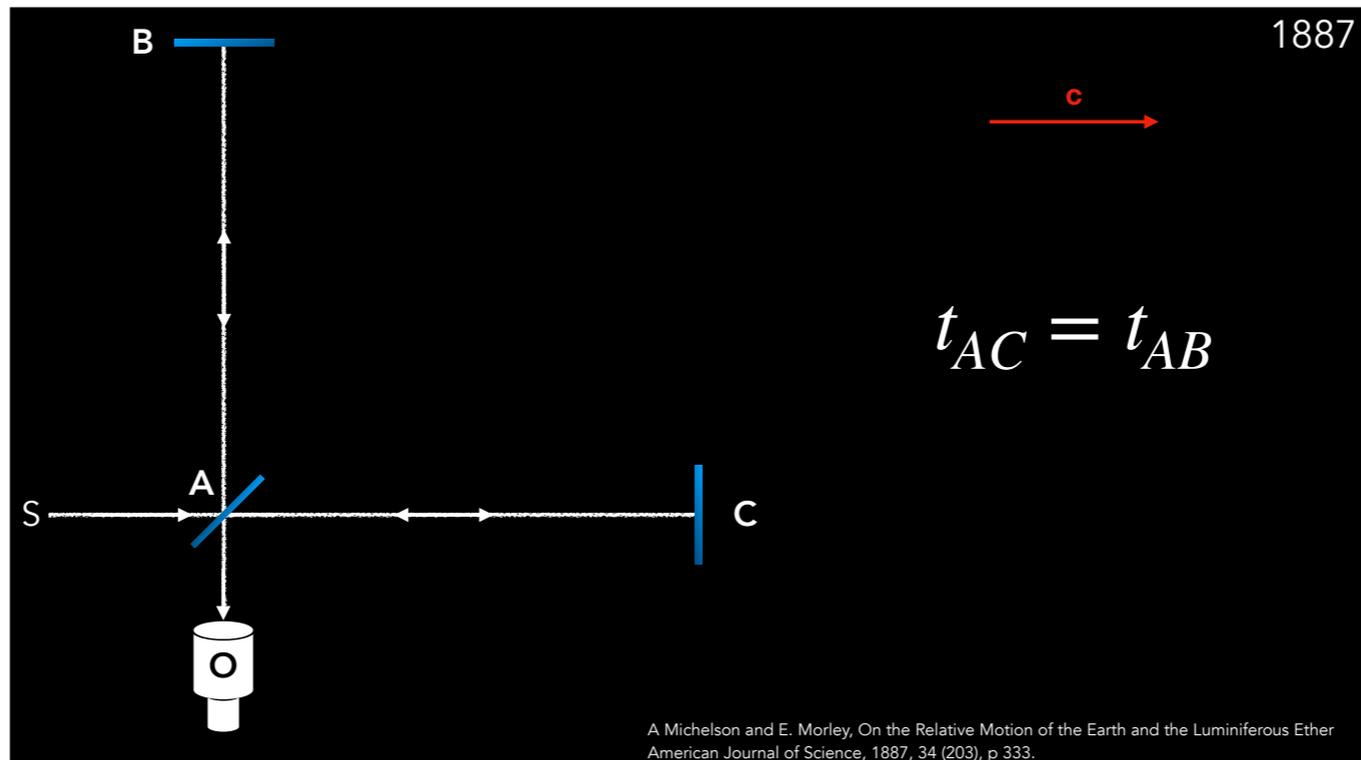
La vitesse de la lumière mesurée sur Terre devrait être égale à la vitesse de la lumière par rapport à l'éther plus ou moins la vitesse de la Terre selon que la lumière est émise dans le sens du déplacement de la Terre ou en sens opposé. Qu'en est-il ?



Pour répondre à cette question, il n'y a qu'une chose à faire, comme le suggéra Hendryk Lorentz : « [...] on fera bien [...] de s'adresser à l'expérience pour apprendre à connaître l'état, de repos ou de mouvement, dans lequel se trouve l'éther à la surface terrestre »

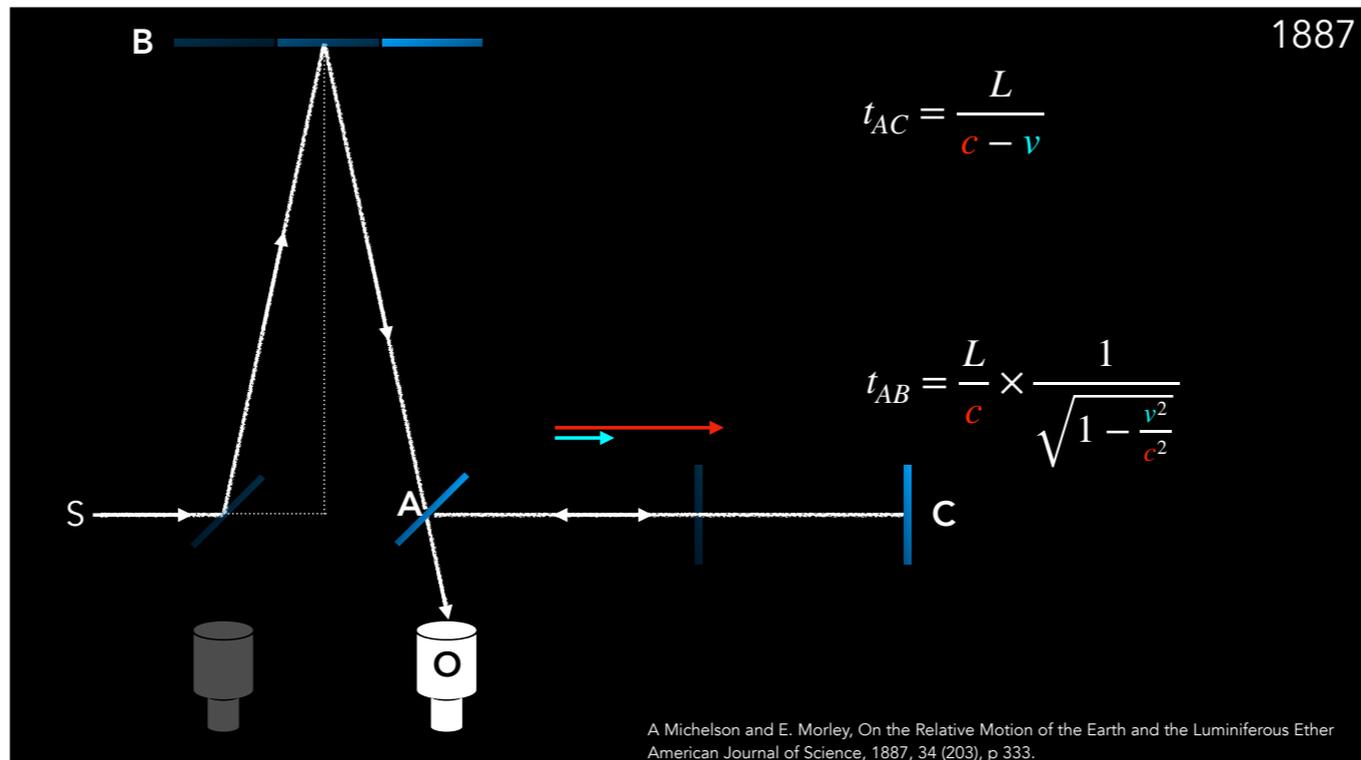
Ce sont les physiciens américains Albert Michelson, que nous avons déjà rencontré, et Edward Morley qui ont tenté de réaliser en 1887 à l'Université de Cleveland dans l'Ohio une expérience pour déterminer la vitesse relative de la Terre par rapport à l'éther et prouver ainsi l'existence de l'éther luminifère ...

L'expérience nulle la plus célèbre de tous les temps ... nulle dans le sens où le résultat est zéro !

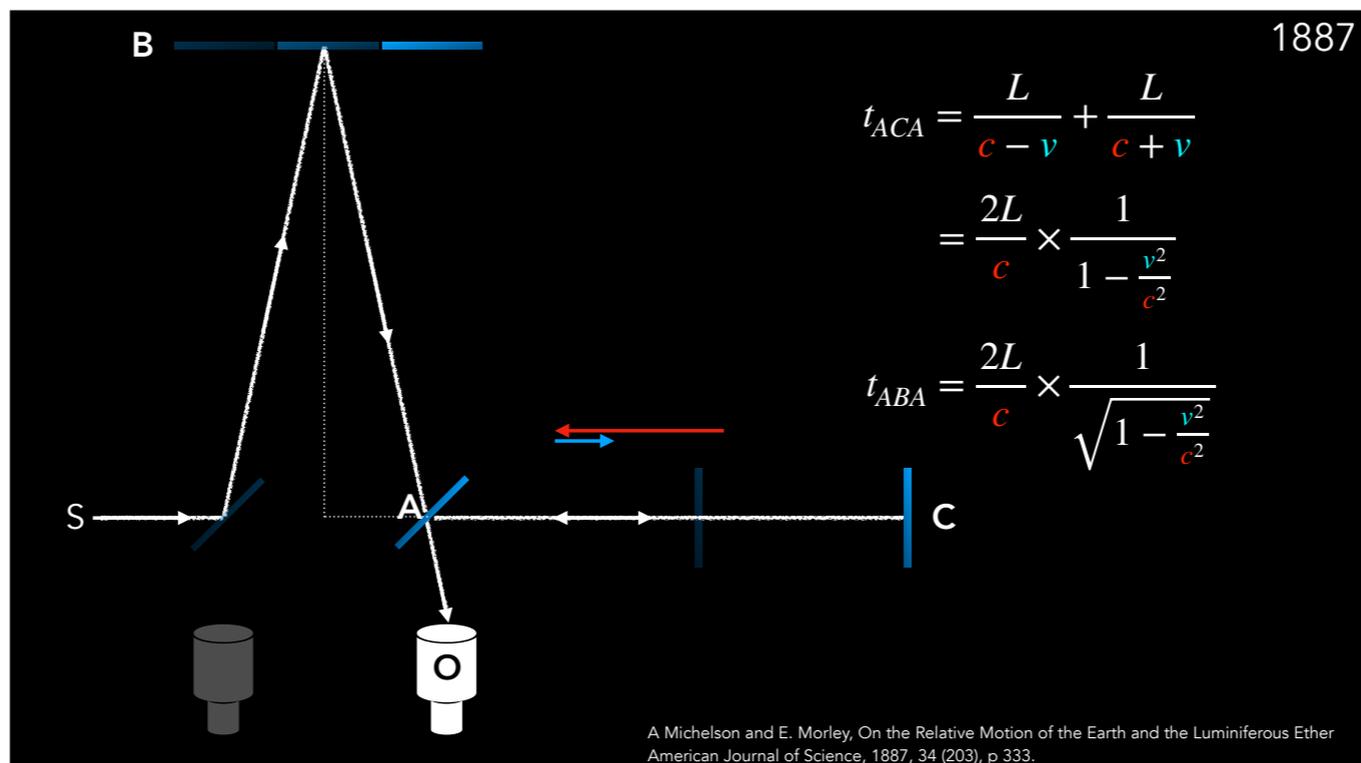


Le principe de la mesure est la suivante :

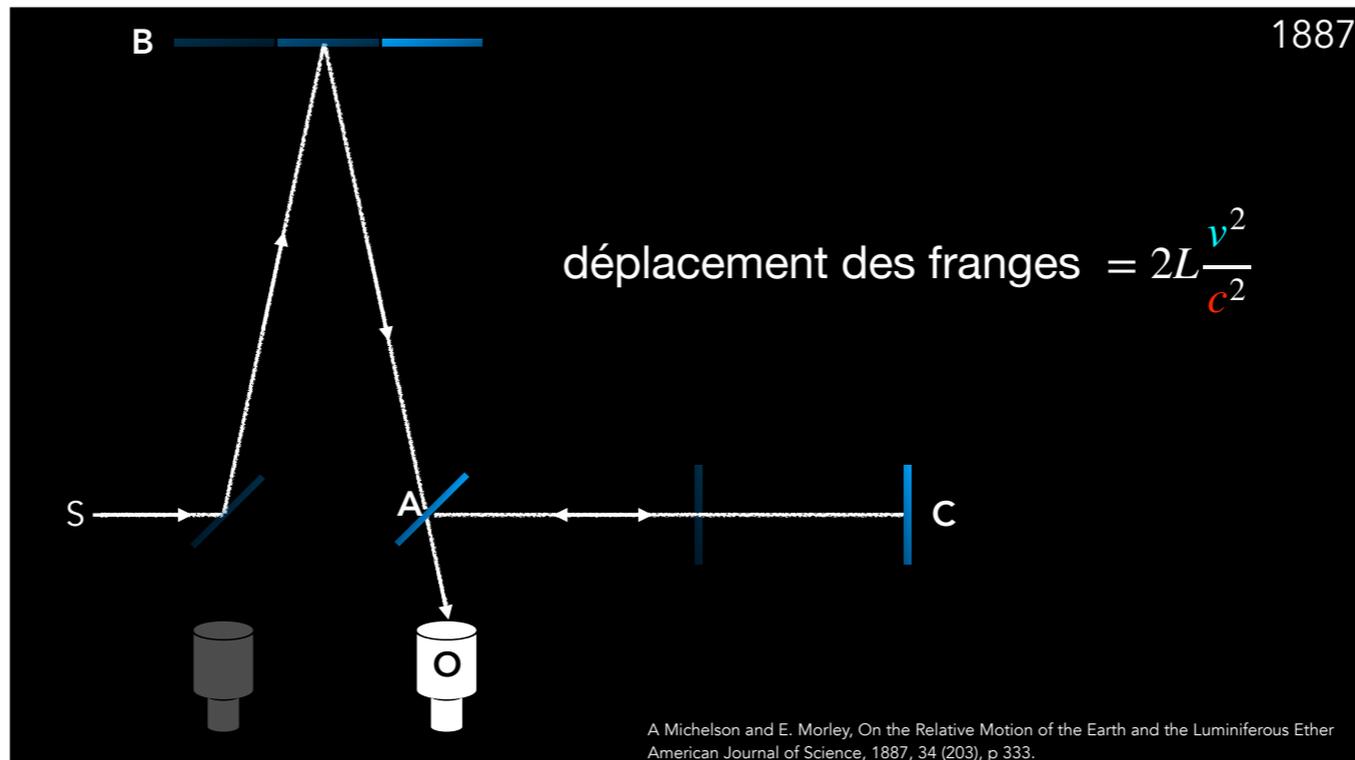
La lumière est émise par une source en S, elle est partiellement réfléchiée en A vers C et partiellement transmise en A avec B. Elle est réfléchiée par les miroirs de B vers A et de C vers A. En A la superposition des 2 rayons est dirigée vers l'observateur O. Les deux distance AC et AB étant strictement égales et si la Terre est au repos dans l'éther les 2 rayons mettent exactement le même temps pour revenir au point A où ils interfèrent constructivement et O observe les franges d'interférence.



Si maintenant au contraire la Terre se déplace dans l'éther avec une vitesse v dans la direction AC , en tenant de la loi de composition des vitesses, en allant vers C la vitesse de la lumière devrait être $v+c$ et en revenant vers A à $v+c$. Ainsi le temps mis par la lumière pour un aller retour AC sera différent du temps mis pour un aller retour AB et les franges d'interférence seront décalées en conséquence.



Si maintenant au contraire la Terre se déplace dans l'éther avec une vitesse v dans la direction AC , en tenant de la loi de composition des vitesses, en allant vers C la vitesse de la lumière devrait être $v+c$ et en revenant vers A à $v+c$. Ainsi le temps mis par la lumière pour un aller retour AC sera différent du temps mis pour un aller retour AB et les franges d'interférence seront décalées en conséquence.



On peut maintenant calculer le déplacement attendu des franges d'interférence. Considérant la vitesse de la Terre sur son orbite égale à 30 km/s et la vitesse de la lumière égale à 300.000 km/s, le déplacement attendu est de $2D \times 10^{-8}$, $D = 11$ mètres et pour la longueur d'onde de la lumière issue de la source S ($\lambda = 550$ nm), le déplacement attendu était de 0,4 franges. Dans leur publication, Michelson et Morley notent que le déplacement, si déplacement il y a, est inférieur à 1/40ème de la valeur attendue ce qui impliquerait que la vitesse de la Terre sur son orbite devrait être moins du 1/4 de la vitesse connue !

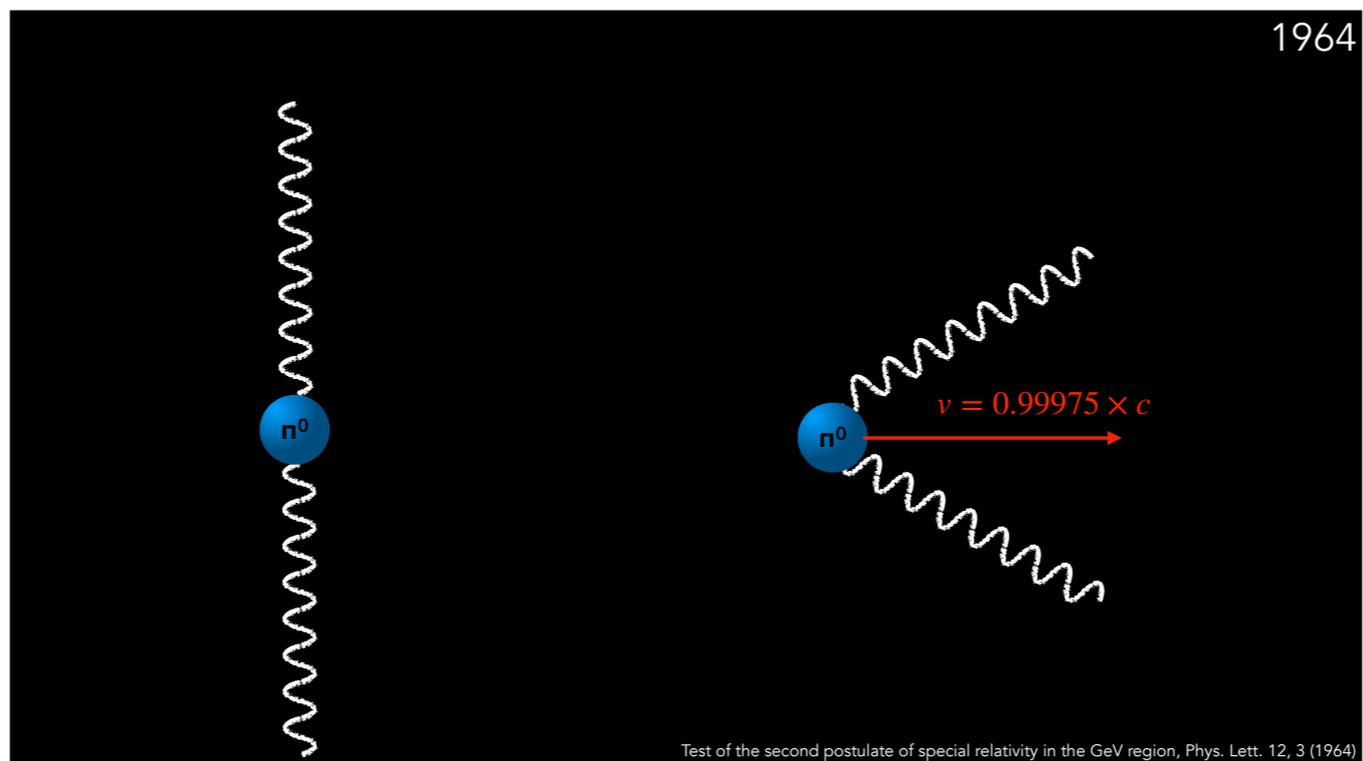
Le mouvement de la Terre dans l'éther est petit

A Michelson and E. Morley, On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether
American Journal of Science, 1887, 34 (203), p 333.

En conclusion ils écrivent, qu'« il apparaît, d'après tout ce qui précède, assez certain que s'il y a un quelconque mouvement relatif entre la Terre et l'éther lumineux, il doit être petit »

Le résultat de cette expérience était très embarrassant. Fallait-il remettre en question l'idée d'un éther absolument immobile, ou alors la théorie de Maxwell que la lumière se propage à vitesse constante dans l'éther, ou alors carrément le principe de relativité Galilée. Et si la vitesse de la lumière était invariante

Alors c constante universelle ou vitesse de lumière ? La question reste ouverte. Mais il semblerait que la valeur de la vitesse à laquelle se propage la lumière dans le vide joue un rôle bien plus profond en physique qui dépasse les simples phénomènes lumineux.



En 1964, au CERN, des physiciens ont mesuré la vitesse de la lumière émise par la désintégration d'une particule ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$) qui était produit dans une collision p (19.2 GeV/c)+Be avec une vitesse proche de celle de la lumière ($0.99975 \times c$). La mesure de la vitesse des photons émis reste toujours la même que le pion soit au repos ou non. La vitesse de la lumière reste toujours égale à c (erreur de la mesure 40 km/s) quelque soit l'état de mouvement de la source émettrice.

1983

$$c = 299.792.458 \text{ m/s}$$

17^{ème} Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), 1983

Arrêtons nous un instant à cette valeur de c . Il est tout à fait légitime de demander pourquoi la vitesse de la lumière a justement cette valeur non naturelle pour une valeur invariante.

En effet, comme toutes les constantes, on pourrait les éliminer aisément des équations fondamentales de la physique en choisissant des unités de mesure qui ne soient pas dérivées de nos traditions culturelles et des propriétés physiques de notre planète.

Admettons un instant que nous puissions revenir en arrière et que nous puissions redéfinir sans aucun a priori les unités de mesure tout en connaissant la nature de la lumière et son rôle dans notre univers. Rationnellement nous aurions certainement choisi la même unité pour les distances et le temps de façon à ce que la vitesse de la lumière soit juste le nombre 1, sans unité. Et tout aussi certainement nous ne l'aurions pas appelé vitesse de la lumière, puisque c'est aussi la vitesse de la gravité ou de toute particule sans masse, nous l'aurions peut être appelée constante trucmuche ou constante de l'espace-temps.

Ce faisant nous aurions pu éliminer c de toutes les équations comme celle qui nous intéresse pour ce cours qui serait alors devenue $E=M$ dont la signification sauterait immédiatement aux yeux.

Une telle redéfinition des unités de mesure est faite presque systématiquement lorsqu'il s'agit de faire des calculs complexes dans lesquels on ne veut pas s'encombrer avec c , la valeur de la vitesse de la lumière. Ainsi en 1905 Poincaré commençait un article en précisant : « je choisirai les unités de longueur et de temps de telle façon que la vitesse de la lumière soit égale à 1 »

Alors d'où nous vient le fait que c ne soit pas égal à 1 ? Parce que nous avons choisi une définition bizarre et très géocentrique du mètre et de la seconde. Ce choix nous le devons à la révolution française qui a voulu une « unité qui dans sa détermination, ne renfermait rien ni d'arbitraire ni de particulier à la situation d'aucun peuple sur le globe. » Le mètre est alors défini comme la dix-millionième partie du quart nord du méridien passant par Paris. Une définition dont l'universalité ne saute pas aux yeux ... des martiens, par exemple.

Pour la définition de la seconde, il faut d'abord remonter aux sumériens qui divisèrent la journée en 6 périodes que les romains re-divisèrent pour finir avec 24 périodes. La division de l'heure en 60 minutes est un héritage du système sexagésimal des babyloniens (système pratique pour compter sur les doigts, 5 doigts d'une main pour les retenues et les 4x3 phalanges de l'autre main pour les unités comptées avec le pouce), qui fut bien plus tard adopté avec l'apparition des montres équipées de la grande aiguille qui indique les minutes et de la trotteuse qui indique les secondes. Ce qui donne la définition très géocentrique de $1/86400$ du jour solaire terrestre.

Aujourd'hui le mètre est défini par rapport à la vitesse de la lumière (et non plus l'inverse) à savoir « le mètre est la longueur du trajet parcouru par la lumière dans le vide pendant l'intervalle temporel de $1/299\,792\,458$ seconde » (1983). Mesurer une distance revient ainsi à mesurer une durée (un temps) ce que l'on peut faire de façons beaucoup plus précises que la mesure avec une règle.

Quant à la seconde, elle est égale à la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé. (1967)

On peut avec ces définitions discuter grandeurs de physique avec les martiens ou tout autres habitants d'exoplanètes quelconques.

Pour rire : en sommant tous les chiffres de c , on trouve 55, soit $5+5 = 10$, soit $1 + 0 = 1$. Or le chiffre 1 en numérologie ésotérique représente l'unité fondamentale de toute création. Étonnant, non !

La propagation de la lumière continue cependant à intriguer en ce début de 20^{ème} siècle, d'autant plus que le résultat des mesures de Michelson et Morley semblent contredire l'idée que l'on s'en faisait.

Comme nous allons le voir la semaine prochaine, les physiciens vont d'abord procéder à un bricolage astucieux pour expliquer le résultat de la mesure de Michelson et Morley tout en préservant l'idée de l'éther avant qu'Albert Einstein ne traite le problème de la façon la plus radicale possible.

La vitesse de la lumière est-elle
constante ?

Avant de terminer, deux petites questions pour nourrir vos réflexions d'ici la semaine prochaine.

Peut-on encore mesurer c ?