

Zeitschrift: Bulletin de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles = Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg

Herausgeber: Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles

Band: 99 (2010)

Artikel: Einstein, comment a-t-il pu faire sa relativité juste avant l'an 1905?

Autor: Schneuwly, Hubert

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-308884>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 28.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Einstein, comment a-t-il pu faire sa Relativité juste avant l'an 1905 ?

Par HUBERT SCHNEUWLY
Professeur émérite de l'Université de Fribourg

Résumé

Albert Einstein a été une grande star et l'est encore et toujours. Mais je trouve qu'on ne devrait pas en faire un dieu et du succès de sa théorie un dogme. Einstein a fait un raisonnement simple et humain. Tout jeune, il était employé de la Confédération à Berne. Il n'avait que 26 ans. Ce n'est que plus tard qu'il a montré qu'il avait des idées abstraites et mathématiques, donc qu'il devenait un vrai grand savant.

Je voudrais me mettre, avec un peu d'agilité, dans la peau d'Einstein tel que, tout un chacun avec un baccalauréat en poche, aurait fait sa relativité. Il aurait certainement pu faire à un large public comprendre ses idées. Sa relativité a eu des conséquences très importantes pour la vision de notre monde d'aujourd'hui où il a ajouté une quatrième dimension à notre espace.

La relativité de Galilée

Lorsqu'on roule à 120 km/h sur l'autoroute et qu'un chauffard nous dépasse avec ses 160 km/h, sa vitesse par rapport à la notre est de $160 - 120 = 40$ km/h. On appelle ces 40 km/h la vitesse relative. Lorsque sur l'autoroute parallèle, il y a un automobiliste qui roule conformément au règlement à 120 km/h, nous pouvons dire que, par rapport à nous, il roule à $120 + 120 = 240$ km/h. Ces 240 km/h sont sa vitesse relative par rapport à la notre. Lorsqu'on est dans le TGV, qui roule à 300 km/h, et qu'on se déplace dans le wagon en marchant, notre vitesse est de 5 km/h par rapport au wagon, mais de $300 + 5 = 305$ km/h par rapport aux rails. On peut dire que les 5 km/h sont notre vitesse relative par rapport au wagon, mais que la vitesse de 305 km/h est notre vitesse relative par rapport aux rails.

Peut-être que vous avez fait une expérience comme moi dans le train de Berne. Je regardais ma montre. Mon train allait partir d'un instant à l'autre. Et, en regardant les wagons de l'autre train, j'ai vu qu'on partait. Tout en regardant défiler les autres wagons, nous allions toujours plus vite. Et lorsque j'ai vu le dernier wagon, j'ai vu que la gare ne se déplaçait pas. J'ai cru que nous avions une vitesse, alors que nous étions au repos.

Peut-être que vous n'avez jamais fait cette expérience. Alors je vous suggère de vivre la suivante. Vous êtes sur un paquebot en mer suffisamment loin du rivage. Vous ne voyez que la mer et les vagues. Du pont, est-ce que votre paquebot se déplace ou ce ne sont que les vagues ? Le soir, vous êtes à l'intérieur pendant le bal, est-ce que vous êtes sûrs que votre paquebot a une vitesse de 25 nœuds/h ?

On peut faire beaucoup d'expériences. On ne peut voir que des vitesses relatives, de sorte qu'on ne peut même pas dire si on a une vitesse ou si on est au repos. Autrement dit, on ne peut pas parler de vitesse absolue ou de repos absolu.

C'est Galilée qui a trouvé cela aux environs de l'année 1600, il y a donc déjà 400 ans. Galilée, vous savez quand même qu'il a fait, en plus, des expériences à la tour penchée de Pise. Qu'il n'y ait pas de vitesse absolue ou de repos absolu, c'est ce qu'on appelle la relativité de Galilée.

Cent ans auparavant, en 1492, Christophe Colomb découvre l'Amérique. Il voulait aller aux Indes non pas par l'Orient mais par l'Occident. On savait que la terre était ronde et qu'il fallait un jour pour que le soleil se retrouve au zénith. Le soleil mettait donc 24 heures pour tourner une fois par jour autour de la terre. Christophe savait que, si c'était midi chez nous, il fallait attendre 8 heures pour qu'il fasse midi en Californie. Moi, j'ai pris l'avion à Paris pour aller à Los Angeles. Il fallait 12 heures. Je suis parti à midi de Paris et je suis arrivé à Los Angeles vers 5 heures à l'heure locale de Los Angeles.

Mais comment faut-il faire si Galilée avait raison ? Galilée trouvait que ce n'était pas le soleil qui tournait autour de la terre, mais que la terre tournait autour d'elle-même, l'axe nord-sud. Le pourtour de la terre est de 40'000 km. Alors, en 24 heures, un point sur la terre a une vitesse de $40'000 : 24 = 1670$ km/h, alors que nous pensons que nous sommes au repos. Pour faire, comme

nous le suggère Galilée, pour aller à Los Angeles, il suffit de s'élever chez nous à midi, par exemple en hélicoptère, et d'attendre sur place 8 heures, que la terre ait tourné pour que nous se retrouvions à Los Angeles et de redescendre en hélicoptère pour y arriver à midi heure locale de Los Angeles.

Mais, Galilée a poussé son idée de relativité encore plus loin. Pour lui, ce n'était pas le soleil qui tournait autour de la terre, mais l'inverse. La terre tournait autour du soleil et qu'il fallait une année. La distance terre-soleil est d'environ 160 millions de kilomètres et la vitesse qu'aurait la terre serait d'environ 100'000 km/h. Cette vitesse est énorme. Chez nous, nous savons qu'un avion militaire, qui dépasse la vitesse du son, a une vitesse plus grande que 1000 km/h. C'est ainsi qu'il faut à l'avion moins d'un quart d'heure pour aller de Genève à Romanshorn. Avec la vitesse de la terre, qui est cent fois plus grande, il faudrait un centième d'un quart d'heure, c'est-à-dire environ 10 secondes. Si on croit l'idée de la relativité de Galilée, nous ne nous apercevons pas de cette vitesse.

Et vous, est-ce que vous croyez au système solaire comme vous l'a expliqué le prof de physique ? Êtes-vous convaincu, que nous sommes sur une planète qui tourne sur elle-même et qui tourne comme les autres planètes autour du soleil? Comme Archimède, avec-vous eu un « Euréka » dans votre cœur, dans votre sentiment, dans votre plexus solaire ?

Votre prof de physique vous a fait comprendre qu'il existe d'autres systèmes solaires et que l'astrophysicien Mayor à Genève nous a démontré qui y existent d'autres planètes dans d'autres systèmes solaires. Votre prof de physique vous a fait comprendre qu'il y a des millions et des milliards de systèmes solaires dans notre « voie lactaire ». Notre voie lactaire n'est qu'une des galaxies qui existent par millions et milliards dans notre univers. Notre univers est énorme puisqu'il pourrait être de 100 milliards d'années lumière. La distance d'une année-lumière (1 a.l.) est de 10'000'000'000'000'000 m = 10^{+16} m, donc pour notre univers 10^{+27} m.

Votre prof de physique vous a aussi convaincu que notre univers était né du Big Bang. Je pense qu'il vous a aussi convaincu que notre univers n'est qu'un parmi les milliards d'autres univers, dont nous ne verrons jamais rien d'eux, qui sont nés par l'« inflation » après le Big Bang ou par la théorie des cordes et des membranes de 1995 ou des superstrings.

Est-ce que Dieu fait partie de notre univers ou d'un autre ? Et comment Dieu a-t-il pu voir notre galaxie parmi les milliards autres ? Comment a-t-il pu voir dans notre galaxie parmi les milliards de systèmes solaires notre système solaire et même notre planète ...

Mais je déconne comme un contemporain de Galilée, il y a quatre cents ans. Il était dominicain et voyait les choses un peu comme moi. Le pape lui a fait un procès d'inquisition. Et il a été condamné. On l'a brûlé sur la place publique à Rome le 17 février 1600. C'était Giordano Bruno.

Le pape a dû prendre Galilée pour un gamin, un imbécile ou un sot. Il aurait dû le gifler, lui tirer les cheveux ou lui botter les fesses. Pour un chrétien de l'époque, la terre était le centre du monde. Dieu le père n'aurait jamais eu l'idée de faire Adam et Eve sur une terre si ce n'est pas le paradis. Il n'aurait jamais non plus eu l'idée d'envoyer son fils sur une planète perdue dans le monde.

Au cours d'un très long procès, le tribunal a condamné Galilée à la prison en 1633, où il a finalement publiquement renié ses idées de la relativité. Lorsque les évêques et les cardinaux du tribunal avaient finalement quitté la cour, Galilée s'est approché du public et leur a dit : « eppur, si muove », « et pourtant, elle se meut, elle bouge ».

Pour Galilée tout comme pour Einstein, leur façon de comprendre passait par les émotions, les sentiments, le plexus solaire, leur intuition comme l'« Euréka » d'Archimède. Si la compréhension ne passe que par l'aspect formel, on pourrait la voir comme une névrose obsessionnelle.

Alors, retournons à la base de la relativité.

Début de la relativité d'Einstein

Il y a 150 ans, l'électricité et le magnétisme étaient deux choses très différentes. En 1820, H. Oersted a trouvé que l'électricité pouvait influencer l'aiguille magnétique. Pour lui, il y avait un conflit entre l'électricité et le magnétisme.

En 1856, W. Weber et R. Kohlrausch ont comparé la charge électrique et la charge magnétique par l'expérience. Ils ont trouvé

$$q \text{ (magn)}/q(\text{électr}) = 3.23 \cdot 10^{-9} \text{ sec/m}$$

Les unités des charges n'étaient pas les mêmes. C'est pour cela que dans leur rapport apparaissent les unités de longueur et de temps. Mais si on inverse le rapport, on trouve pour

$$q(\text{électr})/q(\text{magn}) = \text{longueur / temps}$$

ce que nous appelons une vitesse. Dans l'expérience en laboratoire, il n'y avait aucun rapport avec la vitesse. Mais dans le rapport des charges, on trouve approximativement

$$q(\text{électr})/q(\text{magn}) = 300'000 \text{ km/sec}$$

A cette époque, on connaissait la vitesse de la lumière qui était approximativement la même.

Mais quelle pouvait bien être la relation entre la lumière et le rapport entre l'électricité et le magnétisme ? C'est J. C. Maxwell qui réunira en 1867 l'électricité et le magnétisme qu'on appelle aujourd'hui l'électromagnétisme ou électrodynamique où dominait la lumière comme une onde électromagnétique. On savait à son époque que la lumière selon ses couleurs avait des longueurs d'onde différentes. Si Maxwell avait raison, alors il devait exister des ondes électromagnétiques de longueur d'onde, disons, de 50 cm. C'est Heinrich Hertz qui le démontra en 1887. Et depuis, on sait que les ondes de l'ultraviolet et de l'infrarouge, des rayons X, des ondes de radio et de télévision, du natel et du SMS, même le radar des flics ont la même vitesse que la lumière.

Depuis Galilée en 1600, on savait que la vitesse absolue et le repos absolu n'existaient pas. La vitesse n'était que relative. Vous savez aussi que les vagues sur l'eau et le son dans l'air sont des ondes qui ont des vitesses qui sont relatives à notre vitesse. Alors, on s'est posé la question qu'elle est la vitesse relative des ondes de la lumière. Comme la vitesse de la lumière est grande, il fallait la mesurer dans un système qui a une grande vitesse. Le

système qui a la plus grande vitesse qu'on connaissait, c'était la vitesse de la terre en mouvement autour du soleil avec une vitesse de 100'000 km/h.

C'est en 1887 que Michelson et Morley ont fait l'expérience. Ils voulaient savoir qu'elle est la différence de la vitesse de la lumière parallèlement à la vitesse de la terre et celle perpendiculairement à la vitesse de la terre. Il est trop difficile de vous expliquer comment ils ont fait l'expérience. Mais votre prof de physique vous l'expliquera.

Ce qui fut la grande surprise, c'est qu'on ne trouva pas de différence avec une précision de 0.1 pour mille. Alors est-ce que cela voulait dire que Galilée avait tort ? La conclusion était que la vitesse de la lumière ne pouvait changer d'un système à l'autre.

Pourquoi la vitesse de la lumière n'avait-elle rien à faire avec la vitesse relative du système ? Je pense qu'Einstein devait y voir un dilemme. Il y croyait à la relativité de Galilée et il y croyait encore d'une certaine façon. Mais son dilemme était que la vitesse de l'onde lumineuse était de la même grandeur de 300'000 km/sec que le rapport entre $q(\text{magn})/q(\text{électr})$ qui n'avait rien à faire avec la vitesse. Il trouvait que le rapport $q(\text{magn})/q(\text{électr})$ n'avait rien à faire avec la vitesse relative du système et devait être une chose absolue. Et pourquoi cette vitesse de la lumière était aussi absolue que la grandeur absolue de $q(\text{magn})/q(\text{électr})$ et que les deux avaient la même valeur :

$$q(\text{électr})/q(\text{magn}) = \text{vitesse de la lumière}$$

Pour Einstein, c'était précisément parce que le rapport $q(\text{magn})/q(\text{électr})$ était une valeur absolue, indépendant de la vitesse du système, et égale à la vitesse de la lumière, que la vitesse de la lumière devait être une vitesse absolue. Peut-être pour Einstein, cela voulait lui dire qu'aucun signal ne pouvait aller plus vite que la lumière. Ou, autrement dit, on ne pourrait jamais voir qu'un corps puisse se déplacer plus vite qu'un signal. Donc, il est impossible de voir la vitesse d'un corps qui soit plus grande que celle de la lumière. Alors pourquoi un corps pourrait-il avoir une vitesse plus grande que la lumière ?

On savait depuis Galilée que, si on laisse tomber un objet, il acquiert une vitesse qui est proportionnelle au temps

$$v = g \cdot t$$

où g est proche de 10 m/sec^2 . Si on laisse tomber l'objet pendant 1 seconde, sa vitesse sera de 10 m/sec . Si il pouvait tomber pendant 1 jour, c'est-à-dire environ $100'000 \text{ sec}$, sa vitesse deviendrait $1'000'000 \text{ m/sec}$. S'il pouvait tomber pendant une année, sa vitesse deviendrait $365'000 \text{ km/sec}$, c'est-à-dire plus grande que la vitesse de la lumière.

Einstein devait être géné. Il faudrait que l'objet ne puisse jamais dépasser la vitesse de la lumière, même si elle pouvait tomber pendant un temps infini. Il trouvait que la vitesse donnée par la formule de Galilée était bonne tant que la vitesse restait petite par rapport à la vitesse de la lumière. Plus le temps était grand, il voulait bien que la vitesse v continue à s'augmenter, mais qu'elle devienne égale à la vitesse c de la lumière que si le temps devenait infini.

C'est là qu'Einstein a eu l'idée géniale, que pourtant tout mathématicien peut vous démontrer la formule facilement :

$$\frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = g \cdot t$$

où g est l'accélération. (Fig. 1)

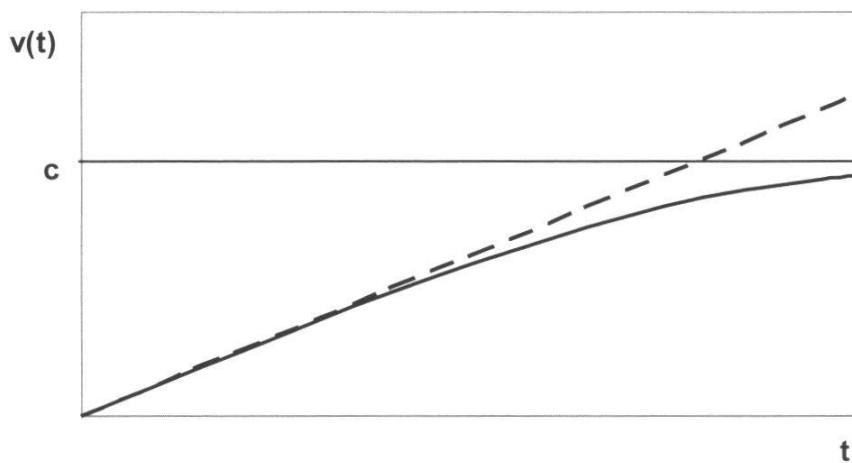


Figure 1 : La vitesse en fonction du temps. La droite (--) correspond à $v = g \cdot t$, qui dépasse la vitesse c de la lumière après un certain temps. La courbe correspond à la formule, où la vitesse v ne dépassera jamais la vitesse c de la lumière.

Einstein était très satisfait par cette formule. Mais pour lui, il fallait savoir quelles seraient les conséquences pour que cette formule ait un sens.

Il y a 300 ans, Newton avait défini la force qui accélérerait la masse d'un objet.

$$\frac{F}{m} = a$$

Pour Newton, l'accélération était la dérivée de la vitesse :

$$a = \frac{dv}{dt}$$

C'était donc avec la formule de Newton pour la force :

$$F = m \cdot a = m \frac{dv}{dt}$$

qu'on a défini l'énergie cinétique ou l'énergie de mouvement, ce qu'on dit du travail que fait la force accélératrice pour que la masse atteigne la vitesse. L'énergie cinétique de Newton est simplement

$$E_{cin} = \frac{mv^2}{2}$$

Sa définition par intégration est simple et on trouve bien

$$\begin{aligned} E_{cin} &= \int_0^d F \cdot dx = \int_0^d m \cdot a \cdot dx = \int_0^d m \frac{dv}{dt} \cdot dx = \int_0^d m \cdot dv \frac{dx}{dt} = \\ &= \int_0^v m \cdot v \cdot dv = m \cdot \frac{v^2}{2} - 0 \end{aligned}$$

Si la vitesse est nulle, l'énergie cinétique est aussi nulle puisqu'il n'y a pas de mouvement.

Einstein pouvait vraiment très bien modifier la force de Newton par sa nouvelle formule :

$$F = m \cdot \frac{d}{dt} \frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Mais il voulait savoir ce qu'elle ferait de l'énergie cinétique. Comme il avait fait une maturité fédérale à Aarau, il connaissait le calcul d'intégrales. En faisant son calcul, il avait trouvé :

$$\begin{aligned} E_{cin} &= \int_0^d F \cdot dx = \int_0^d m \cdot \frac{d}{dt} \cdot \frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot dx = \dots = \int_0^v m \cdot \frac{d}{dt} \cdot \frac{c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot dt \\ &= \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2 \end{aligned}$$

où v était la vitesse de l'objet et c la vitesse de la lumière. La première partie contenait bien la vitesse de l'objet, mais la seconde partie devait être l'énergie de mouvement à vitesse nulle. Mais cela ne tenait pas debout pour lui. Ce qu'il avait calculé ne devait être que de l'énergie du mouvement. Il a dû se tromper en faisant le calcul. Il a dû faire et refaire le calcul pour qu'il soit correct. Mais son calcul lui donnait toujours le même résultat.

Je pense qu'avec le temps il voulait bien admettre le côté formel, c'est-à-dire que c'était bien que la différence qui était l'énergie cinétique. D'ailleurs, si on part de cette différence et qu'on fait un calcul par approximation lorsqu'on suppose que la vitesse de l'objet reste raisonnable, c'est-à-dire petite par rapport à la vitesse de la lumière, on retrouve bien l'énergie cinétique de Newton.

$$E_{cin} = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \cong mc^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} - 1 \right) = \frac{mv^2}{2}$$

Pour Einstein, une énergie cinétique était une énergie mécanique. Cette masse ne peut avoir de l'énergie que si elle est en mouvement. Mais dans mc^2 , ce c est la vitesse de la lumière qui n'a rien à faire avec la mécanique. Cette vitesse de la lumière n'est en rapport qu'avec l'électricité et

le magnétisme. Il ne pouvait ou ne voulait pas voir un rapport entre cette masse et l'électromagnétisme. La vitesse de la lumière n'était pour lui qu'une limite de vitesse pour une masse. En fait, il voulait bien admettre que, dans son calcul de l'énergie cinétique, il y avait une différence et cette différence concernait bien la masse. Et en plus, la vitesse v n'était, en fait, que relative, il était donc évident que l'énergie de mouvement elle-même n'était bien que relative.

Mais, ce mc^2 chiffonnait Einstein. Est-ce qu'il pourrait peut-être donner un sens à ce mc^2 ? Ce mc^2 était même le double de l'énergie de mouvement lorsque la vitesse de l'objet serait égale à la vitesse de la lumière, alors que l'objet ne pourrait jamais avoir cette vitesse. Donc ce mc^2 ne pouvait rien avoir à faire avec l'énergie cinétique. En plus, cette vitesse de la lumière était une vitesse absolue. Donc ce mc^2 était le même dans tous les systèmes, qu'ils soient en mouvement ou au repos. Si ce mc^2 était une énergie, ce ne pourrait être qu'une énergie absolue, contrairement à l'énergie cinétique qui ne pouvait être que relative.

Einstein s'est rendu compte que si une masse, en tombant, acquérait une vitesse, donc une énergie cinétique, c'était parce que cette masse était attirée par la terre. Donc la terre était responsable pour que la masse acquière une énergie cinétique. Donc la terre était la cause pour que la masse ait pour effet une vitesse. Donc la terre était active et la masse passive ou inerte. Donc si la terre était active, elle devait avoir une énergie à transmettre à la masse inerte.

Cette transmission se faisait par la gravitation. Dans la gravitation, la force était due à l'attraction des masses, qu'on pourrait dire actives ou pesantes. Sur terre, la force de gravité accélérerait la masse inerte \mathbf{m} . Pour Newton, l'accélération de la masse passive \mathbf{m} est due aux masses actives ou pesantes \mathbf{m}' et \mathbf{m}'_T (masse de la terre).

$$G \frac{m'_T m'}{R^2} = mg$$

Il y a de bonne raison que la masse active \mathbf{m}' dans la gravitation soit différente de la masse inerte et passive \mathbf{m} . D'ailleurs on peut bien voir que l'accélération de Galilée est proportionnelle à la masse active \mathbf{m}' et qu'elle est inversément proportionnelle à la masse passive \mathbf{m} dans la formule.

$$g = \frac{Gm'_T m'}{R^2 m} \propto \frac{m'}{m}$$

Mais, que la masse accélérée par la gravitation soit grande ou petite, l'expérience de tous les jours montre bien que l'accélération \mathbf{g} est toujours la même. Par conséquent, la masse inerte \mathbf{m} est toujours proportionnelle à la masse active \mathbf{m}' . En plus, la masse active \mathbf{m}' n'influence en rien la masse passive \mathbf{m} . Pourtant, l'activité et la passivité de la masse restaient une vraie question philosophique pendant très longtemps pour Einstein.

Dans sa formule, Einstein voyait la masse passive \mathbf{m} dans l'énergie cinétique et la masse active \mathbf{m}' dans mc^2 . Pour lui, les masses ne pouvaient alors qu'être les mêmes, c'est-à-dire qu'elles devaient être identiques. Mais une masse ne pouvait être active que dans la gravitation. C'est alors qu'Einstein a estimé que les lois de physique ne devaient pas seulement être les mêmes dans des systèmes de référence de Galilée, mais qu'elle devaient être les mêmes dans un ascenseur au repos, en vitesse constante et en chute libre, c'est-à-dire dans un système accéléré par la gravitation. Et puisqu'il intervenait la vitesse de la lumière dans la formule mc^2 , la lumière devait avoir des conséquences dues à la gravitation, comme il l'a fait dans la relativité générale.

La plénitude de la relativité d'Einstein

Mais, restons à la formule où nous avons trouvé l'expression d'Einstein pour l'énergie cinétique. Si on ajoutait ce mc^2 à l'énergie cinétique, on pourrait parler d'énergie totale.

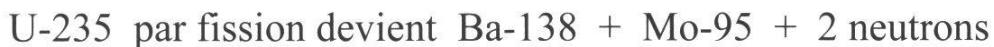
$$E_{cin} + mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2 + mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = E_{tot}$$

Mais Einstein avait beaucoup de difficultés pour prendre au sérieux cette énergie de masse mc^2 parce que, de toute façon, on ne pouvait rien en faire. On pouvait l'écrire, on pouvait l'imaginer ou, formellement, l'admettre.

Donc ce $E = mc^2$ serait l'énergie de la masse.

Je ne sais pas qui prenait cette énergie de masse au sérieux en 1905 et les années qui suivirent. Si cela avait été une grande découverte, on aurait dû s'en occuper tout de suite. Et les années se passent. La première guerre mondiale 1914-18 fait beaucoup de victimes. Les américains interviennent aussi, à la fin. Vingt ans après, c'est la deuxième guerre mondiale. Les américains interviennent aussi en Europe à la fin. Et nous savons ce qui s'était passé plus tard en août 1945 à Hiroshima et à Nagasaki : deux bombes atomiques.

Le principe était sur la fission de noyaux atomiques. Ainsi, par exemple :



Ces nombres nous disent le nombre de particules qu'on appelle des nucléons. Le nombre de nucléons après la fission est le même qu'avant la fission. D'ailleurs il est impossible de changer le nombre de nucléons dans l'univers, même pas au CERN.

En prenant 1 kg d'uranium 235, on obtient pour le produit de la fission Ba-138 + Mo-95 + 2 neutrons 999.1 g. Par la fission, nous avons perdu environ 1 g ou 900 mg. Ce sont ces 900 mg qui se transforment en chaleur.

Dix ans plus tard, les américains ont fait exploser une bombe H. Dans une bombe H, on fait de la fusion. De l'hydrogène lourd fait par fusion de l'hélium :



En prenant 1 kg d'hydrogène lourd on trouve à la sortie 996 g d'hélium. Pour 1 kg d'hydrogène lourd, il y a 4 g qui se transforment en chaleur. C'est ce qui se passe sur le soleil et dans presque toutes les étoiles.

Je voudrais vous donner une idée de l'énergie de ce qu'on peut gagner en transformant 1 kg de masse. Si vous avez trop de poids et que vous pourriez transformer votre 1 kg en énergie, cela vous donnerait :

$$mc^2 = 90'000'000'000'000'000 \text{ Joules} = 25'000'000'000 \text{ kWh}$$

Si vous devez payer 20 centimes pour 1 kWh, alors vous feriez fortune, puisque cela vous rapporterait environ 5000 millions de francs des entreprises électriques (EEF). Alors, il ne faut pas hésiter. Mais même si vous ne pouvez vendre que 1 g aux EEF, cela vous rapportera plus que ce que vous pouvez gagner avec les 6 nombres au loto, c'est-à-dire 5 millions.

Rappelez-vous l'expérience de Michelson et Morley. Pour simplifier, disons que Michelson mesurait la vitesse de la lumière dans la direction du mouvement de la terre autour du soleil, Morley dans la direction perpendiculaire. A la grande surprise, ils ont trouvé la même vitesse alors que, selon la relativité de Galilée, les vitesses devaient être différentes. Pour mesurer des vitesses, il faut mesurer des longueurs et des temps. Einstein a eu l'idée que Michelson avait son chronomètre et Morley le sien, et que leurs chronomètres ne donnaient pas le même temps. Il trouvait peut-être que le chronomètre de Michelson avait des secondes plus longues que le chronomètre de Morley ?

Si vous avez un rendez-vous et qu'il ne vous reste que dix minutes pour être à l'heure, il vous faut vous dépêcher. Alors, vous allez le plus vite possible, peut-être avec une Ferrari. Mais lorsque vous arrivez au haut de la rue de Lausanne, il vous reste une minute et vous êtes tout rassuré. Vous avez le sourire aux lèvres lorsque vous voyez madame. Mais, elle est fâchée parce que vous êtes encore et toujours en retard. Elle n'a pas votre heure, mais elle a la même heure à l'Albertinum, donc une horloge au repos. Alors, même si nous sommes pour l'égalité des sexes, vous la prenez par affection par les épaules et vous la consoler.

Si nous n'avons pas la même heure, c'est à cause de la relativité.

Vous savez qu'aujourd'hui, l'heure est donnée par l'électronique ce qui est beaucoup plus précis que la montre ou l'horloge mécanique.

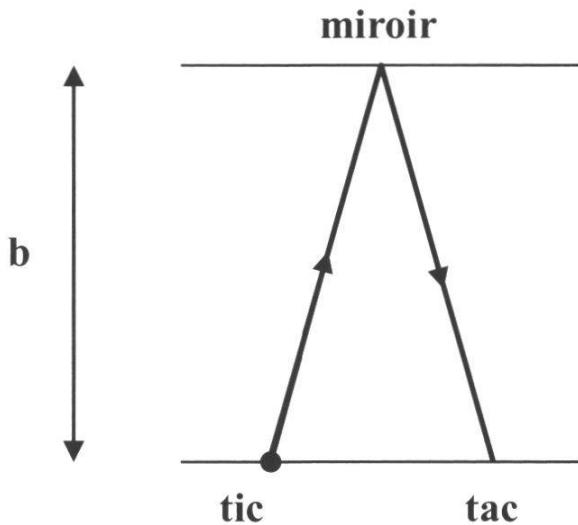


Figure 2 : Une horloge aux rayons lumineux. Le signal part lorsque la lampe fait *tic*. La lumière avec sa vitesse **c** sera réfléchie au miroir et fera *tac* au retour ; **b** est la distance entre le miroir et le lieu du *tic-tac*.

On imagine une horloge à rayons lumineux. Cette horloge fait *tic* lorsque la lampe s'allume et elle fait *tac* lorsque le rayon lumineux, après avoir été réfléchi par le miroir, revient en ayant parcouru une distance totale de **2b**. La relation entre la distance parcourue par le rayon lumineux et le temps mis à cet effet sera :

$$2b = ct$$

c est la vitesse de la lumière et le temps **t** entre le *tic* et le *tac*, disons la « seconde » de référence.

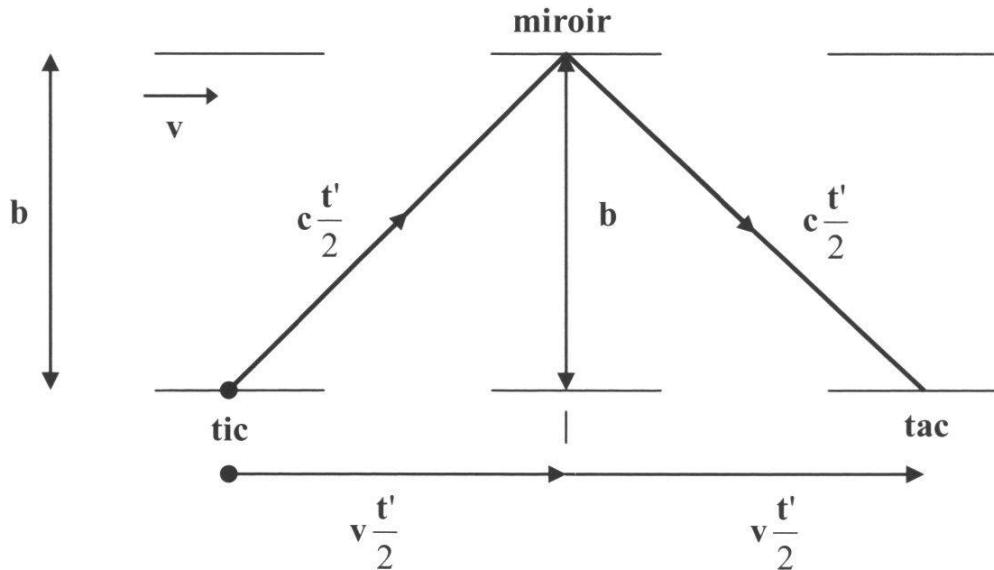


Figure 3 : L'horloge aux rayons lumineux se déplace à la vitesse v .

Si cette horloge à rayons lumineux se déplace avec une vitesse v et que la vitesse de la lumière c reste la même dans le système en mouvement, alors nous allons désigner le temps qui s'écoule entre le *tic* et le *tac* par t' , et le chemin parcouru par la lumière pendant ce temps t' sera ct' . Dans un triangle rectangle comme celui-ci, l'hypoténuse au carré est égale à la somme des carrés des côtés. Alors on peut écrire :

$$\left(c \frac{t'}{2}\right)^2 = b^2 + \left(v \frac{t'}{2}\right)^2 \quad \text{ou} \quad (c^2 - v^2) \left(\frac{t'}{2}\right)^2 = b^2$$

$$\text{ou} \quad (c^2 - v^2)(t')^2 = (2b)^2$$

Mais dans l'horloge au repos (Fig. 2), la distance **2b** est la distance parcourue par le rayon lumineux en un temps t comme nous l'avons supposé plus haut. Donc

$$(c^2 - v^2)(t')^2 = c^2 t^2 \quad \text{ou} \quad (t')^2 = \frac{c^2 t^2}{(c^2 - v^2)} = \frac{t^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

et enfin, en prenant la racine carrée, on obtient :

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Si les deux horloges ne se déplacent pas l'une par rapport à l'autre, c'est-à-dire si $v = 0$, la racine carrée sera égale à l'unité. Donc, les deux temps sont les mêmes : $t' = t$. Si la seconde horloge est en mouvement, alors la racine carrée du dénominateur est plus petit que l'unité et cela donne que $t' > t$, c'est-à-dire qu'un observateur dans le système au repos trouve que l'horloge dans le système en mouvement va plus lentement ou que la « seconde » est plus longue. De son point de vue, le temps est dilaté dans le système en mouvement. Le temps passe plus lentement. On appelle cela la *dilatation du temps*.

A supposer qu'en allant au rendez-vous, on a été très vite, c'est-à-dire que dans la formule entre le temps t' et t , on aurait eu $v^2/c^2 = 0.2$. Sous la racine, on aura $1 - 0.2 = 0.8$ et la racine carrée donnera 0.9. Dans le temps $t = 10$ minutes que nous avons, Madame voit dans ces dix minutes $t' = 10/0.9 = 11$ minutes pour nous.

Mais Madame était de bonne foi. Elle pense qu'elle a raison. Nous allons essayer de la convaincre. Une montre fait à chaque *tic-tac* une seconde. Alors pour dix minutes, il faut faire $10 \times 60 = 600$ fois *tic-tac*. Mais la seconde de notre *tic-tac* est 10% plus long, c'est-à-dire $600 \times 1.1 = 660$, donc une minute de trop. Mais, pourtant vous vous rappelez, que je vous ai dit qu'on venait avec une minute d'avance, donc il nous suffit neuf minutes, c'est-à-dire $540 \times 1.1 = 594 = 600$. C'était pour cela que nous étions rassurés au haut de la rue de Lausanne. Mais je sais que Madame ne peut pas comprendre. C'est le cas typique de la scène de ménage.

Nous n'avons plus la même heure. C'est ce que nous appelons la relativité de temps d'Einstein.

Par dilatation du temps, on veut dire que le temps va plus lentement plus la vitesse est grande. Supposons que quelqu'un va à une telle vitesse que sa « seconde » devienne le double que la notre. Alors, si on se quitte à vingt ans et qu'on se revoit vingt ans plus tard, nous aurons quarante ans et elle n'aura que trente ans. Après encore une fois vingt ans, nous aurons 60 ans et elle que 2×20 ans. C'est ainsi qu'elle aura toujours vingt ans.

Lorsque nous avons une vitesse, nous changeons de lieu, les trois dimensions de l'espace. Mais, en plus, nous changeons aussi de temps par

rapport aux autres. Le temps est ainsi la quatrième dimension. Cette quatrième dimension nous exclut le synchronisme des évènements.

Il y a trente ans, en 1975, on a fait une expérience au CERN avec une particule qu'on appelle « muon ». C'est un électron lourd qui n'a une durée de vie que de 2 millionièmes de seconde. On lui a donné une vitesse de 99.94% de la vitesse de la lumière. Elle a alors vécu 60 millionièmes de seconde, c'est-à-dire que sa durée de vie a été prolongée d'une facteur 30. Dans l'Ancien Testament, vous savez que Mathusalem a vécu 969 ans. Est-ce parce qu'il a dû aller très, très vite ? Donc, plus on va vite, moins on vieillit. Vous savez que les gens qui veulent aller dans l'espace interstellaire avec des vitesses énormes voudraient revenir sur terre aussi jeunes après mille ans.

Vous voyez lorsque la vitesse est de 99.94% de la vitesse de la lumière, la « seconde » devient tellement longue, à savoir 30 secondes ou $\frac{1}{2}$ minute. Lorsque la vitesse sera 99.999%, 1 jour deviendra 1 année, 1 mois deviendra 30 ans, 1 année deviendra 4 siècles, etc. Mais si on augmente cette vitesse d'un petit rien pour qu'elle devienne égale à la vitesse de la lumière, alors on entend le *tic* ..., mais je n'entends plus le *tac*. La « seconde » deviendrait tellement longue qu'elle ne se terminera plus du tout. On peut dire que la seconde est infinie. C'est peut-être ce qu'on peut dire de l'éternité.

Au paradis, on dit que c'est l'éternité. Si nous serions au paradis à cause de la vitesse de la lumière, dans cette éternité, il n'y a plus de temps. Donc, plus rien de bougerait au paradis, nous serions tous immobiles comme sur un tableau.

Mais, j'ai oublié de vous parler des *contractions de longueurs*. Lorsque nous sommes au repos, un cube a des dimensions de longueur, de largeur et de hauteur toutes identiques. Mais lorsque nous avons une vitesse parallèle à la longueur, la largeur et la hauteur restent les mêmes. Le rapport entre les dimensions des longueurs sera :

$$a' = a \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \text{c'est-à-dire} \quad a' < a$$

Dans le système qui se déplace à la vitesse v , la longueur a' devient plus courte que a , parce qu'elle est contractée.

Vous savez certainement comment font les flics pour vous coller l'amende d'excès de vitesse. Par le radar, ils mesurent la contraction de la longueur de votre voiture, $\mathbf{a} - \mathbf{a}'$, et en déduisent votre excès de vitesse. Ainsi vous savez que les militaires, les flics et les entreprises électriques nous cachent à nous, les civils en démocratie, leur exploitation de la relativité d'Einstein

Lorsque notre vitesse serait égale à la vitesse de la lumière, $\mathbf{v} = \mathbf{c}$,

$$v^2/c^2 = c^2/c^2 = 1$$

Ceci veut dire que le 1-1 sous la racine est égal à zéro, donc la longueur sera $\mathbf{a}' = \mathbf{0}$. Le cube ne sera plus qu'un carré. Autrement dit, dans le paradis nous serions tout plats comme sur une fresque de Ravenne.

Les relativités d'Einstein et de Galilée

Tous les deux sont d'accord que « les lois physiques doivent rester les mêmes dans tous les systèmes qui se déplacent les uns par rapport aux autres avec une vitesse constante ».

Pour Galilée, les dimensions de l'espace sont le même dans tous les systèmes et le temps est aussi le même dans tous les systèmes. Mais pour Einstein, la vitesse de lumière dans le vide est la même dans tous les systèmes.

Pour Galilée, le mètre et la seconde sont les mêmes dans tous les systèmes. Mais pour Einstein, il n'y a plus que le rapport « mètre/seconde » qui est $q(\text{magn})/q(\text{élect})$ qui soit le même pour la vitesse de la lumière dans tous les systèmes.

Mais pour Galilée comme pour Einstein, il existe toujours des vitesses relatives d'un système par rapport à l'autre.

Je vous ai parlé de la vitesse sur l'autoroute lorsque vous roulez à 120 km/h et sur la route parallèle une autre personne roule aussi à 120 km/h. Par rapport à nous, la personne dans l'autre voiture roule à 240 km/h. Mais l'autre personne prétend, avec raison, que nous roulons à 240 km/h par

rapport à elle. Ceci veut bien dire autant pour Galilée que pour Einstein, il existe toujours la vitesse relative d'un système par rapport à l'autre. Autrement dit : si nous imaginions que le paradis se déplace par rapport à nous à la vitesse de la lumière, alors, pour ceux qui sont au ciel, nous se déplaçons par rapport à eux à la vitesse de la lumière. Ceci veut dire : ils sont au paradis du ciel et, pour eux, nous sommes au paradis sur terre.

Un physicien sait comment on mesure le temps, par exemple par une pendule. Vous savez que le battant fait tic-tac. Il suffit de regarder. La (ou le) pendule fait tic-tac-tic-tac-tic-tac... C'est ainsi que l'on voit que le temps s'avance, on va vers le futur. Mais on peut faire faire au pendule le chemin inverse, donc le tac-tic-tac-tic-tac-tic... Alors le temps recule, il va vers le passé. Mais, si maintenant j'arrête le pendule, le temps s'arrête. Donc c'est la fin.

Mais je dois vous avouer que je ne sais pas ce qu'est le temps.

Mais les médecins, qui sont parmi nous, doivent savoir que j'ai eu il y a cinq ans un AVC, un accident vasculaire cérébral, j'ai eu une aphasicie. On m'a dit que je devais restructurer mon cerveau par la plasticité. Mon psychiatre l'a restructuré de la sorte que je déconne comme aujourd'hui.

Je vous demande pardon. Merci.

Le 8 novembre 2005

Hubert Schneuwly