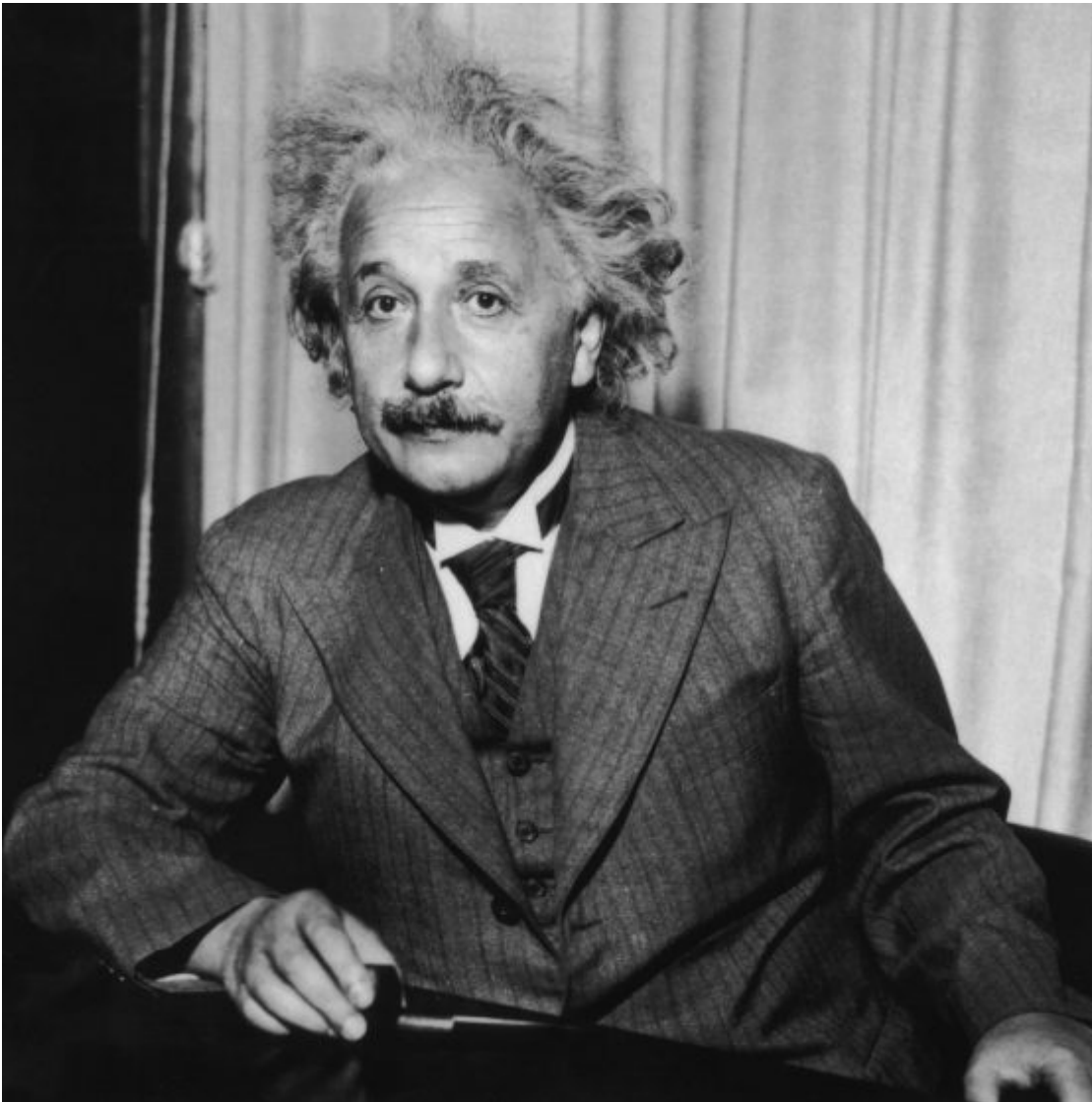
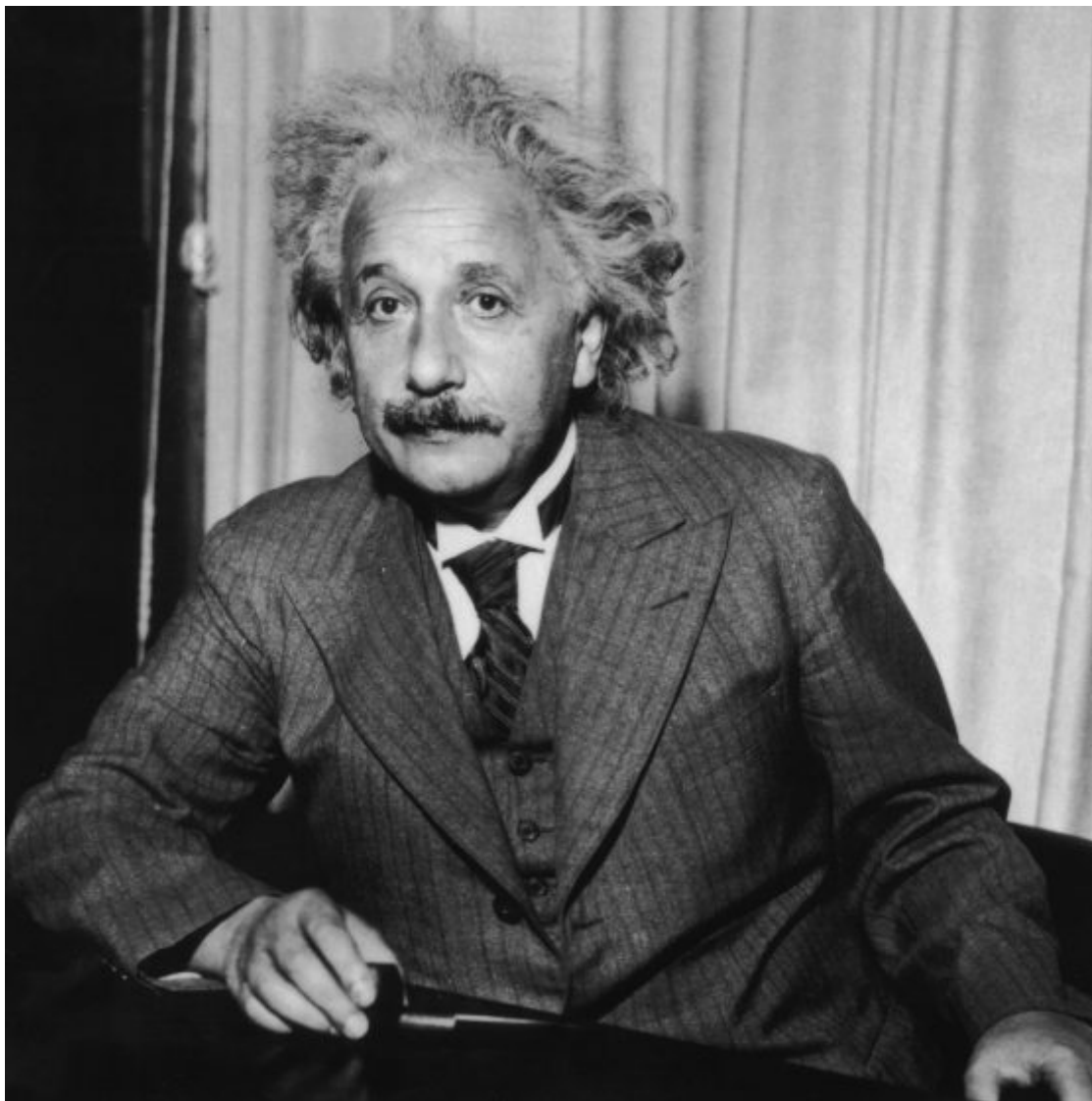


# La Relativité Générale d'Albert Einstein, et oui... (partie 5)

écrit par Cachou | 5 janvier 2022





## **PARTIE 5**

Pour relire (ou lire) la première partie de notre exposé, [c'est ici](#).

Pour relire (ou lire) la deuxième partie de notre exposé, [c'est ici](#).

Pour relire (ou lire) la troisième partie de notre exposé, [c'est ici](#).

Pour relire (ou lire) la quatrième partie de notre exposé, [c'est ici](#).

C'était promis la dernière fois, on attaque !

**LA DILATATION DU TEMPS**

Et oui, mon ami, le temps se dilate. Pas mal, hein ? Voyons ça.

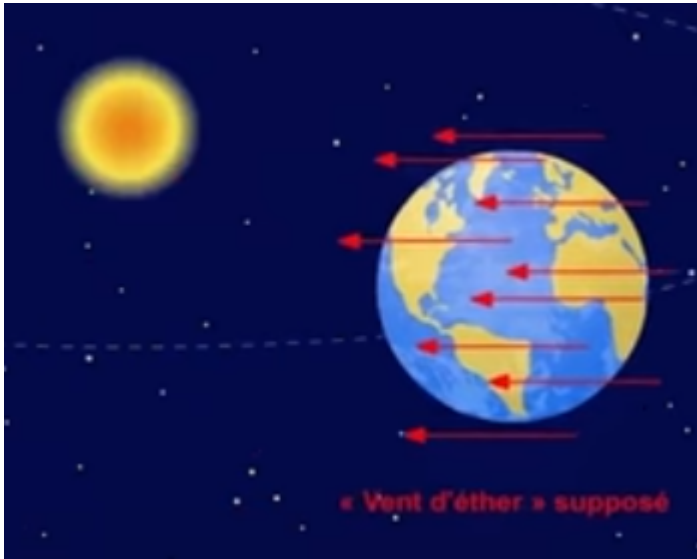
Au XVII<sup>ème</sup> siècle les travaux conjugués [Galilée](#) (1564-1642) et Isaac [Newton](#) (1643-1727) ont posé les bases de la mécanique classique, dont un des principes est la loi de composition des vitesses.

Prenons un train qui se déplace et dont nous connaissons donc la vitesse par rapport au sol.



Prenons le même train avec un archer qui tire une flèche. La vitesse de la flèche par rapport au sol sera la somme de la vitesse de la flèche par rapport au train plus la vitesse du train par rapport au sol. Plus le train ira vite, plus la vitesse de la flèche par rapport au sol sera grande.





Au XVIII<sup>ème</sup> siècle Michael Faraday (1791-1867) travail sur l'[électromagnétisme](#). Il sera persuadé à la fin de sa vie que la lumière est une onde électromagnétique mais n'aura pas pu le démontrer. James

Clark [Maxwell](#) (1831-1879) aura les outils nécessaires pour démontrer l'implication

entre les champs électromagnétiques et les champs électriques. Ce sont les fameuses lois de [Maxwell](#).

Dans ses équations, il apparaît que la lumière se déplace à la vitesse de 300 000 km/s à la constante  $c$ . À l'époque de nombreux scientifiques croyaient à la notion du fameux éther. C'est une espèce de fluide non matériel en suspension dans l'espace qui devait permettre la propagation de la lumière contrairement au vide, dans lequel on pensait que la lumière ne pouvait pas se déplacer. Ceci est complètement faux, la notion d'éther est complètement abandonnée, mais à la suite des expériences, les scientifiques ont pu remarquer trois choses :

1. l'éther (support de propagation inventée de la lumière) n'existe pas. La lumière se déplace dans le vide.
2. la mesure de la vitesse de la lumière sur Terre ne dépend pas du mouvement de celle-ci ni d'aucun référentiel
3. les observations prédites par la mécanique classique ont été mises en défaut. Elle n'est plus suffisante pour expliquer les phénomènes liés à la lumière (ou à une très grande vitesse...)

À l'époque d'Einstein, les trains commençaient à se répandre de plus en plus, et la coordination des horloges devait être parfaite pour les horaires de train quel que soit l'endroit.

Einstein se demande donc si les horloges auraient la même heure dans tous les endroits.

Quand tu prends deux horloges tu en mets une en mouvement, au bout d'un certain temps elles seront désynchronisées (certes, extrêmement faiblement) et elles n'indiqueront plus la même heure. Il y a une dilatation de la durée entre les 2 horloges par rapport à un observateur qui lui est resté immobile et qui les voit toutes les deux.

### Le temps peut donc ralentir

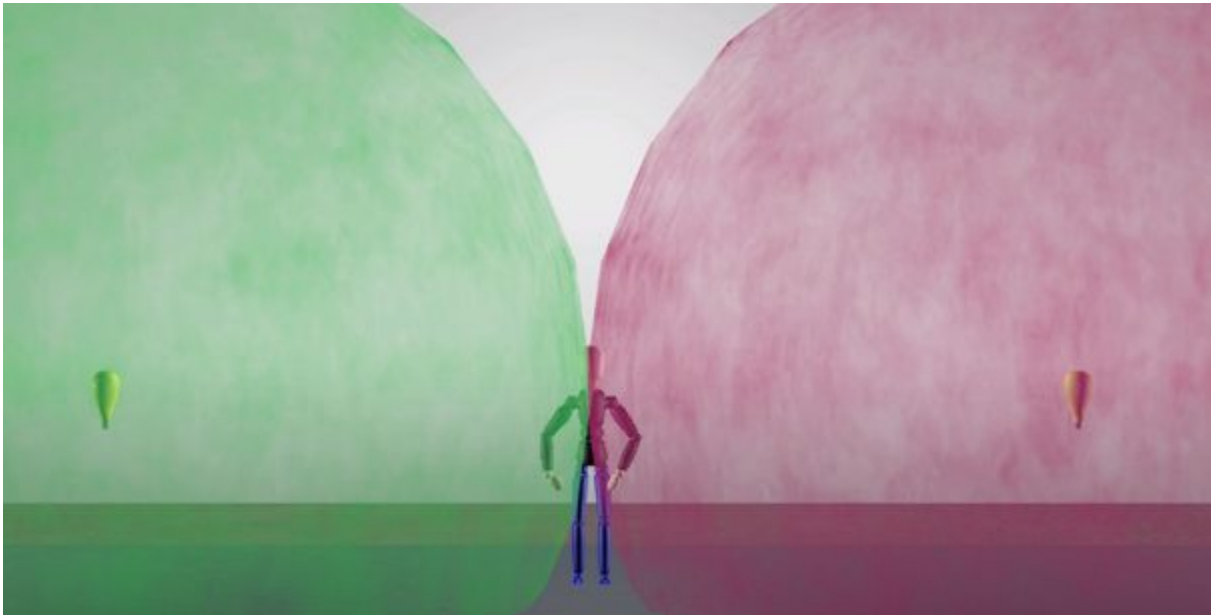
L'année 1905 est l'année de la théorie de la lumière, du temps, et de l'espace : la théorie de la relativité restreinte. Ni le temps, ni l'espace, ne sont désormais absolus et universels comme on le croyait. C'est la seule vitesse de la lumière qui est identique pour tous les observateurs ou qu'ils se trouvent dans l'univers.

### *Voyons une expérience de pensée bien connue :*

Prenons un observateur voyant devant lui deux lampes écartées.



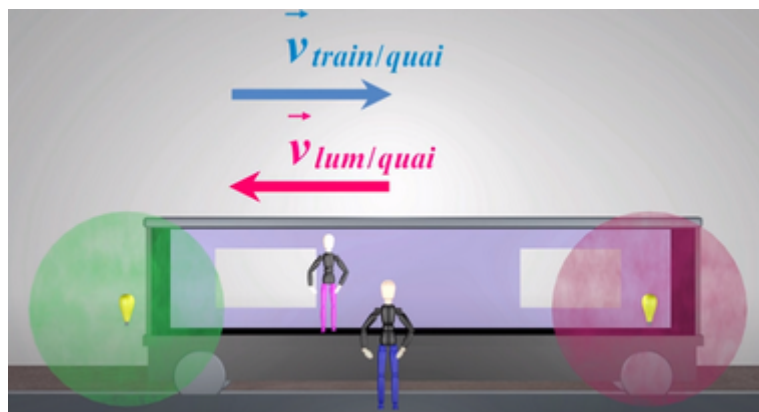
Allumons les deux lampes en même temps. La personne peut dire : *“J’ai vu les deux lampes qui se sont allumées en même temps”* car la lumière lui arrive à son niveau au même moment.

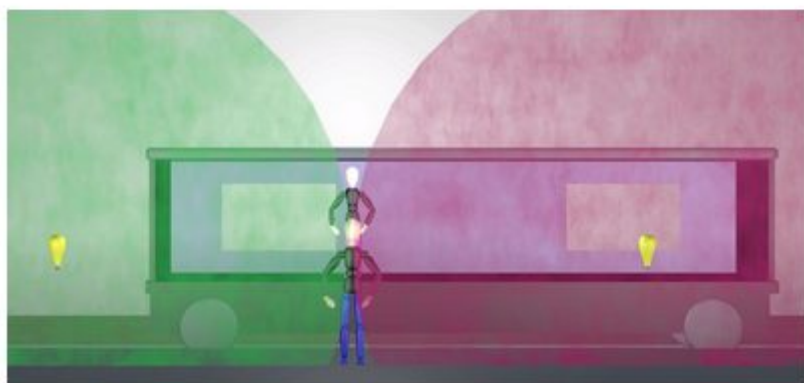
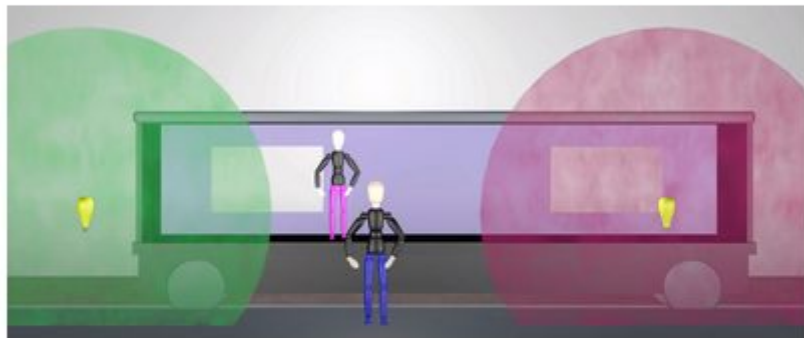
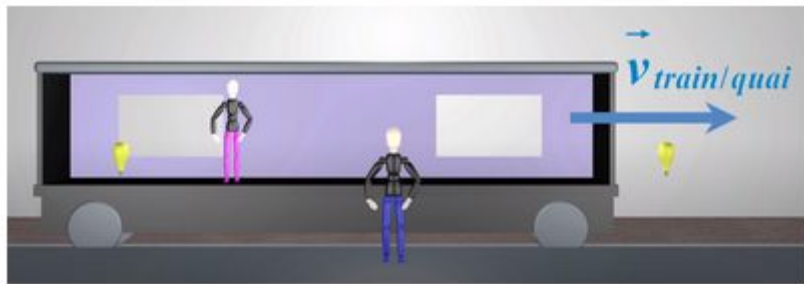


Prenons maintenant un train qui se déplace vers la droite devant l'observateur.



Quand le train arrive devant les deux lampes, elles s'allument. Mais afin que le bonhomme dans le train puisse voir les deux lampes s'allumer en même temps comme observateur, il faut le placer préalablement en arrière du train (à gauche sur le dessin). Ainsi, les deux observateurs pourront dire en même temps qu'ils ont vu les deux lampes s'allumer.

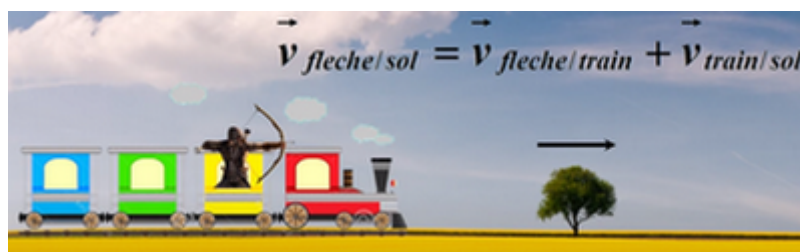




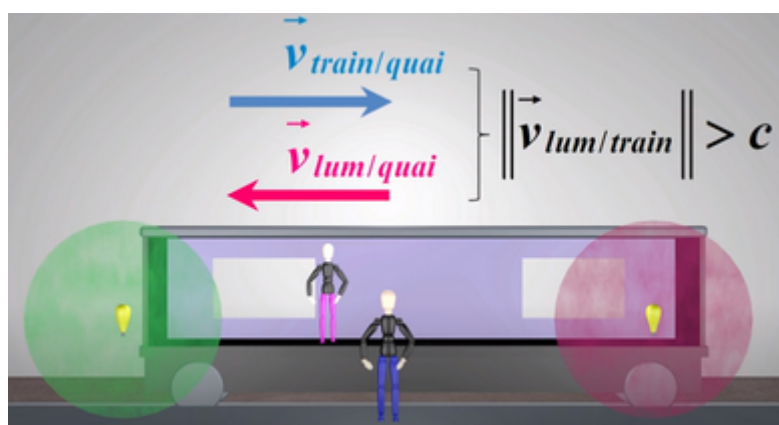
Cette présentation a été faite dans le cadre de la mécanique classique mais elle ne tient pas compte des observations de [Maxwell](#) ni du postulat d'Albert Einstein. Pour comprendre "l'arnaque", il faut revenir un petit peu en arrière.

Nous avons un bonhomme dans le train, et tout ce petit monde se dirige vers la droite. Nous pouvons donc définir une certaine vitesse du train par rapport au quai. Une fois la lampe rouge allumée, la vitesse se propage à 300 000 km/s dans toutes les directions et notamment vers le fond du train (à gauche sur le dessin).

La vitesse de la lumière par rapport au quai est donc de 300 000 km/s. Mais souviens-toi de la loi de composition des vitesses que l'on a expliquée au début quand notre sympathique archer tire sa flèche sur un train qui roule. On avait dit que la vitesse de la flèche été la résultante des sommes des deux vitesses (train + flèche).



Ainsi, l'observateur dans le train observera une vitesse de la lumière qui sera la somme de la lumière elle-même plus la vitesse du train.

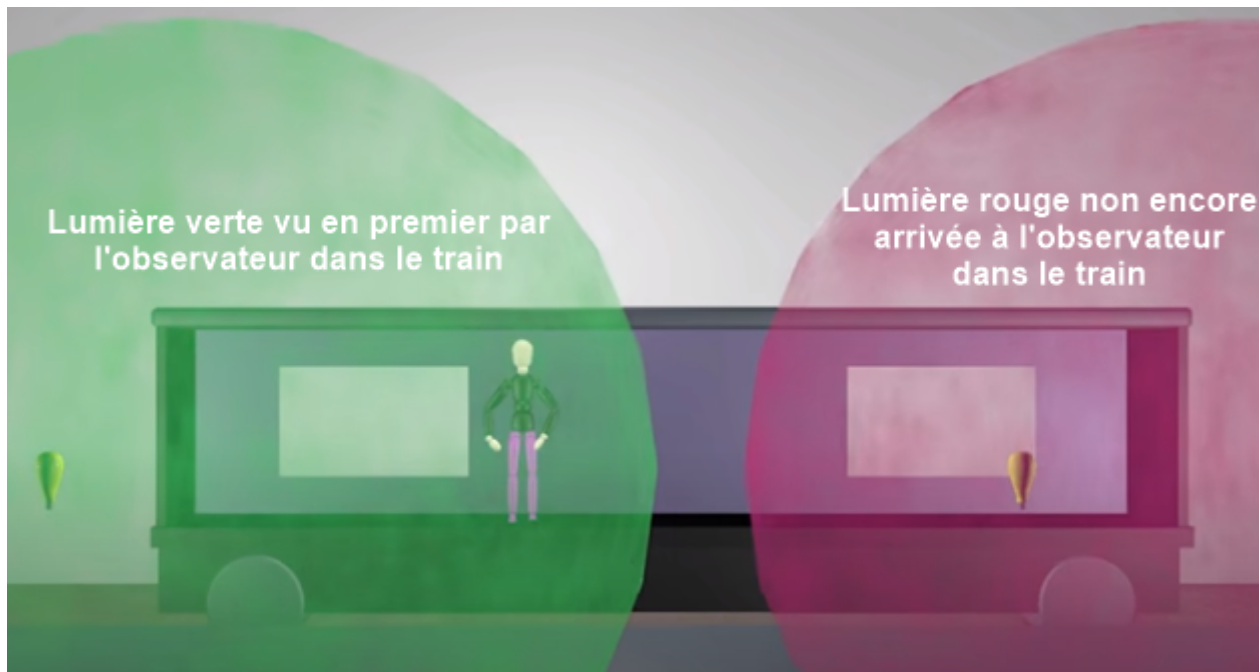
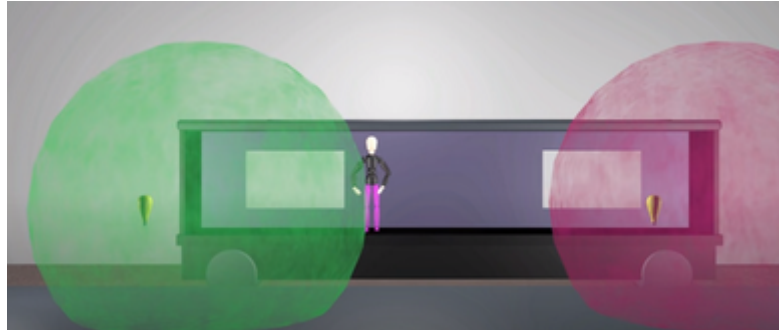


Et ça, d'après Maxwell et le postulat d'Albert Einstein, c'est tout à fait impossible. En effet, que nous dit Einstein ? Que la vitesse de la lumière est la même dans tous les référentiels et qu'elle se déplace à 300 000 km/s (ce qui constitue un postulat démontré). Egalement, la vitesse de la lumière est la plus grande vitesse qui existe dans l'Univers. Il n'existe pas de vitesse supérieure à celle de la lumière. Elle est invariable, elle ne diminue pas n'y augmente.

Le train en mouvement est un référentiel comme tous les autres, et la vitesse se déplace à 300 000 km/s.

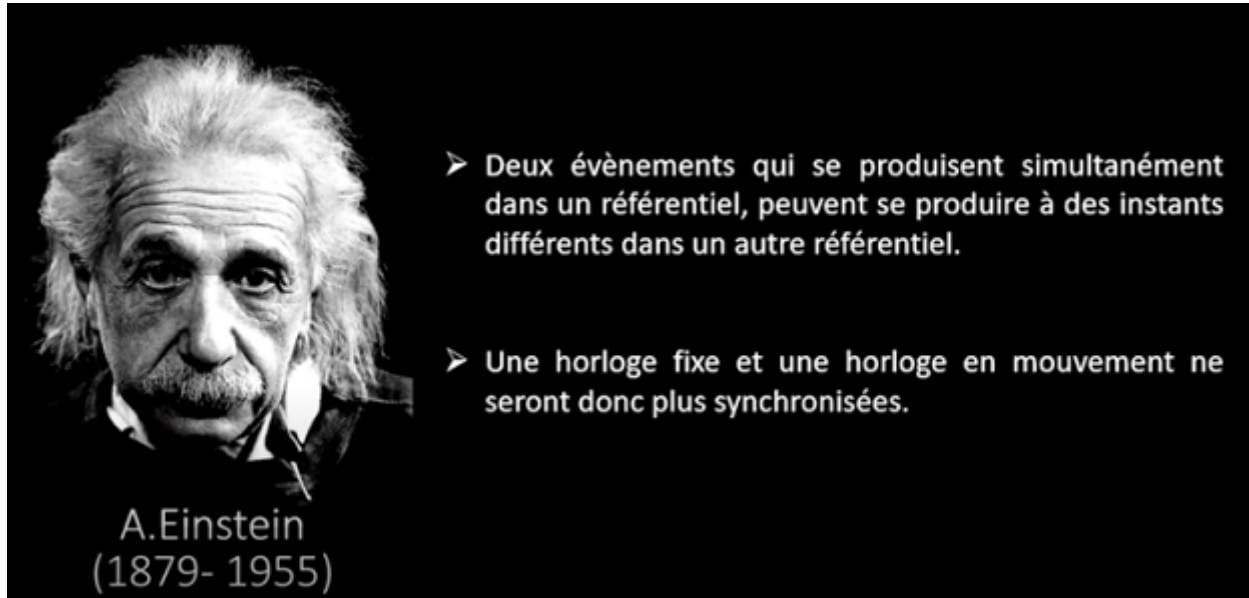


Donc la personne se trouvant dans le train, doit voir la lumière venant de sa droite et de sa gauche à la même vitesse, soit  $300\,000\text{ km/s}$ . Vu son positionnement, elle verra la lumière verte s'allumer avant la lumière rouge.



Dans le cadre de la mécanique relativiste, l'observateur du train ne verra pas les lumières s'allumer simultanément contrairement à l'observateur qui est sur le quai et qui les verra s'allumer en même temps. Ainsi, la perception des événements change dans un référentiel en mouvement par rapport à un autre qui est fixe.

Einstein en conclut donc :



➤ Deux évènements qui se produisent simultanément dans un référentiel, peuvent se produire à des instants différents dans un autre référentiel.

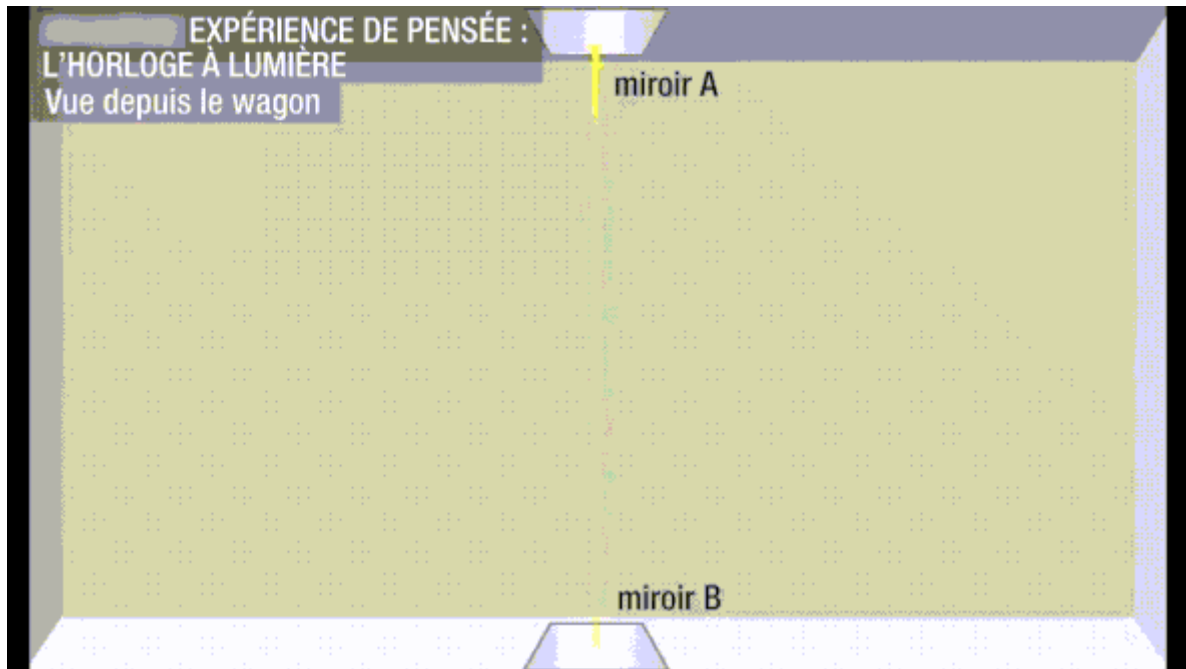
➤ Une horloge fixe et une horloge en mouvement ne seront donc plus synchronisées.

A. Einstein  
(1879- 1955)

Voilà, cette petite démonstration, et les conclusions qu'Einstein en tire sont très importantes. À partir de là, si ta cervelle tient encore le coup, on va voir la dilatation du temps démontré par Einstein.

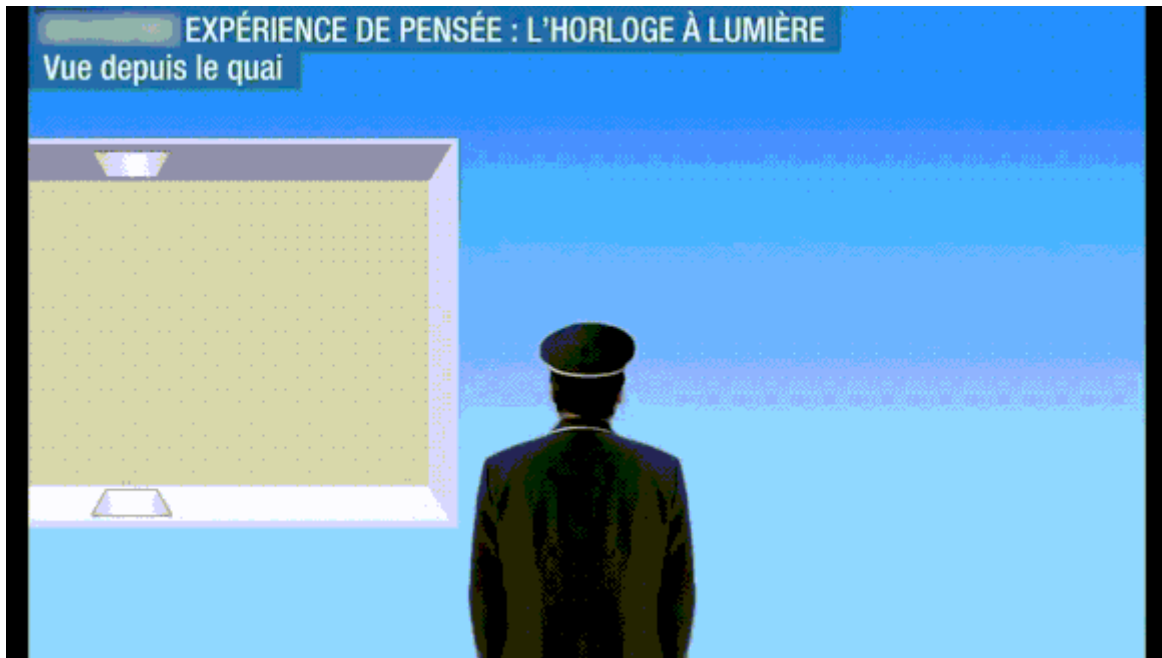
### *Autre expérience de pensée*

On reste toujours dans un train. Dans un wagon deux miroirs se faisant face, l'un au plafond et l'autre au sol. Nous faisons rebondir un rayon de lumière périodiquement sur l'un et l'autre miroir. Nous venons de créer une horloge de pensée. C'est comme le tic-tac que l'on entend d'une horloge chez nous. Nous sommes donc dans le train.



Nous connaissons la distance entre les deux miroirs et l'universalité de la vitesse de la lumière, avec la formule classique :  $D = V \times T$ .

Maintenant, voyons la même chose côté quai. Si le train est en mouvement, et que l'on a à faire à un observateur extérieur qui regarde cette oscillation entre les deux miroirs, les choses sont différentes. Du fait du déplacement du train, l'observateur extérieur verra que la distance parcourue par la lumière entre les deux miroirs est supérieure qu'à l'intérieur.



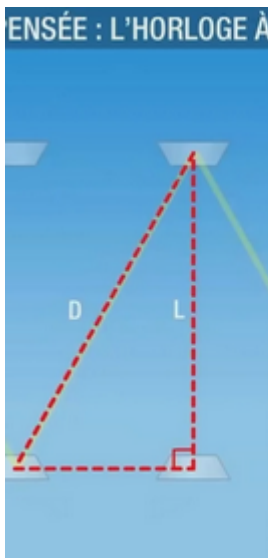
Soit :

- $D$  la distance de la lumière parcourue entre les deux miroirs par une personne de l'extérieur
- $L$  la lumière parcourue entre les deux miroirs par une personne de l'intérieur
- $c$  la vitesse de la lumière
- $T_0$  la période de notre horloge vue de l'intérieur du wagon
- $T$  la période de notre horloge vue de l'extérieur du wagon
- $v$  la vitesse de déplacement du train
- $d$  distance parcourue par le train pendant ce laps de temps

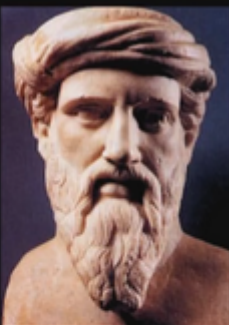
Nous avons :

$$L = c \times T_0$$
$$D = c \times T$$
$$d = v \times T$$

Nous pouvons utiliser le théorème de Pythagore pour relier ces trois longueurs :



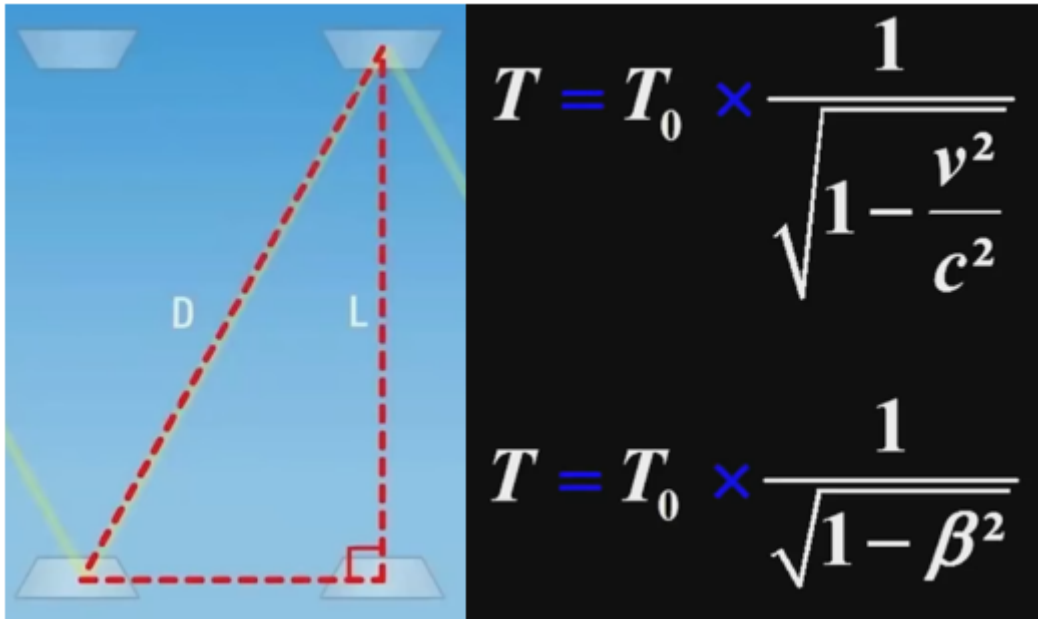
ENSÉE : L'HORLOGE À

$$L = c \times T_0$$
$$D = c \times T$$
$$d = v \times T$$


Pythagore  
(580- 495 av JC)

$$D^2 = L^2 + d^2$$
$$T^2 \times c^2 = c^2 \times T_0^2 + v^2 \times T^2$$

Nous obtenons alors une relation entre  $T_0$  que l'on appellera désormais la période propre et  $T$  qui est la période vue de l'extérieur. Nous remarquons également que du fait de la structure de la formule  $T_0$  est nécessairement toujours plus petit que  $T$



Beaucoup de personnes utilisent les notations de [Lorentz](#) pour alléger cette formule.

This block contains three versions of the time dilation formula and a portrait of Hendrik Lorentz. The formulas are:

$$T = T_0 \times \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

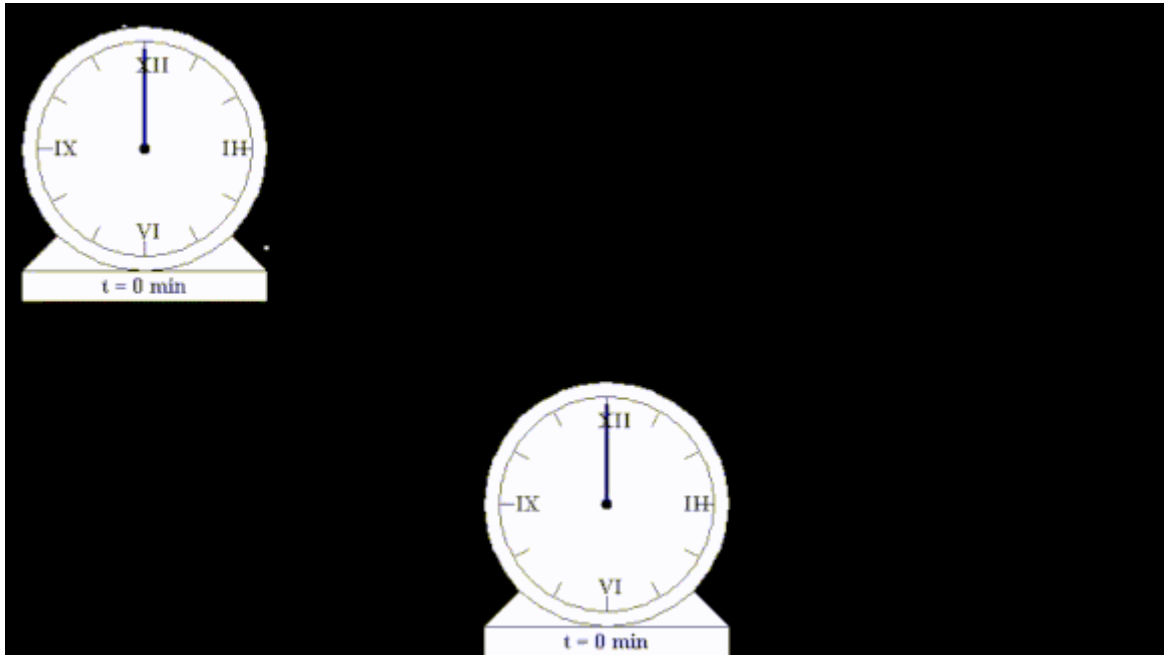
$$T = T_0 \times \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$T = T_0 \times \gamma$$

To the right of the formulas is a black and white portrait of Hendrik Lorentz, with his name and dates (1853-1928) printed below it.

Cette formule nous permet de comprendre ce que dit Einstein quand il parle de désynchronisation des horloges, à savoir que vu de l'extérieur, le tic-tac d'une horloge en mouvement semble plus lent que le tic-tac d'une horloge au repos. Le temps s'écoule donc moins vite pour un passager du train que pour l'observateur qui est sur le quai.

**Ainsi, dans un référentiel en mouvement, le temps passe moins vite.**



Pour ta p'tite tête afin qu'elle n'explose pas, je vais t'expliquer ça autrement

Donc, tu l'as maintenant compris, il y a deux façons de contrôler l'écoulement du temps, avec la vitesse et la gravité, d'après Einstein, ce que nous savons être véridique absolument.

Regarde les explications suivantes d'une expérience de pensée :



Deux jumeaux ont l'âge de 20 ans. L'un reste sur la Terre, et l'autre part dans une fusée. Il voyage à très grande vitesse, puis revient sur la Terre. Son voyage dur un an, à son retour il est donc âgé de 21 ans.



Mais qu'elle n'est pas sa surprise à son retour de constater que son frère et amis seront aussi des vieillards. Pendant son voyage il s'est écoulé 1 an pour lui mais 70 ans sur la Terre. Durant son voyage, le temps s'est écoulé beaucoup plus lentement que sur la Terre. Le jumeau dans la fusée a fait un voyage dans le futur de la Terre de 70 ans.



son retour de constater que son frère et amis seront aussi des vieillards. Pendant son voyage il s'est écoulé 1 an pour lui mais 70 ans sur la Terre. Durant son voyage, le temps s'est écoulé beaucoup plus lentement que sur la Terre. Le jumeau dans la fusée a fait un voyage dans le futur de la Terre de 70 ans.

En voyageant à plus grande vitesse encore, il pourrait faire un saut de plusieurs siècles voire encore plus dans le futur. Voici quelques comparaisons. Supposons que tu fasses trois voyages en fusée toujours d'une durée d'un an chacun mais à des vitesses différentes.

- si tu voyages à 90 % de la vitesse de la lumière, (300.000 km/s) il s'écoule pendant ce temps 2 ans sur la Terre
- si tu voyages à 99.9 % de la vitesse de la lumière, il s'écoule 20 ans sur la Terre mais toujours un an pour toi
- si tu voyages à 99.99999 % de la vitesse de la lumière, il s'écoulera 2000 ans sur la Terre. Tu reviendras donc 2000 ans plus tard dans le futur de la Terre, donc pendant ton voyage le temps se sera écoulé 2000 fois plus lentement que le temps terrestre.

1 an dans la fusée	
Vitesse de la fusée	Temps écoulé sur terre
90 %	2 ans
99,9 %	20 ans
99,99999 %	2000 ans

Alors, tu vas me dire, que c'est de la science-fiction. Et bien non, absolument pas, ce n'est pas de la science-fiction, la vitesse **ralentit vraiment** l'écoulement du temps. Par contre, pour que cela se réalise, il faut que les fusées volent presque à la vitesse de la lumière, et cela est évidemment totalement impossible actuellement.

Par contre on réalise exactement cela dans les accélérateurs de particules. Ces données sont régulièrement vérifiées en laboratoire. Donc, expérimentalement, il est maintenant absolument démontré que la vitesse ralentit le temps. C'est la relativité générale d'Albert Einstein.

## **Vérification expérimentale de Hafele et Keating en 1971 de la dilatation du temps**

L'expérience de Hafele-Keating est un test expérimental de la relativité générale réalisé en 1971 par Joseph Hafele et Richard Keating. Des horloges atomiques synchronisées furent embarquées dans deux avions commerciaux (2 horloges par avion) qui firent deux fois le tour du monde, l'un vers l'est et l'autre vers l'ouest. Comparées à l'arrivée au temps d'une horloge atomique restée à l'Observatoire naval des États-Unis,



les horloges présentèrent effectivement le décalage temporel prévu par la théorie.

En tenant compte des différents plans de vol, les résultats obtenus par les quatre horloges dans les deux cas sont en accord avec les prévisions théoriques :

- une avance  $40 \pm 23$  ns (nanosecondes) pour les horloges voyageant vers l'est
- un retard de  $275 \pm 21$  ns pour le voyage pour les horloges voyagent vers l'ouest.

L'expérience a été répliquée avec succès en 1975, 1996 et 2010. Cette expérience ne fait pas partie des validations les plus connues de la relativité générale mais peut néanmoins être qualifiée de cruciale car elle constitue une observation directe du phénomène de désynchronisation relativiste des horloges, dont l'existence était encore contestée en 1971.

Les Systèmes de positionnement par satellites tels que GPS, GLONASS, Beidou ou Galileo, qui reposent sur l'utilisation d'horloges atomiques placées dans des satellites en orbite autour de la Terre, doivent pour être précis, corriger le phénomène de désynchronisation des horloges mis en évidence par l'expérience de Hafele-Keating.

### ***Vérification expérimentale de Frisch et Smith en 1963 par la désintégration des muons de la dilatation du temps.***

Une autre vérification expérimentale du ralentissement du temps tout aussi passionnante (voir plus pour moi !) est celle de Frisch et Smith en 1963 : la désintégration des muons.

Pour savoir ce qu'est un muon et connaître cette expérience prouvant la véracité de la relativité générale, je te laisse visionner un petit film. Pour cela, [clique ici](#). Je te conseille de le visionner, c'est littéralement passionnant ! Ce petit film terminé, ferme la fenêtre qui s'était ouverte,

et tu reviendras sur cette page.

Avant d'attaquer notre partie suivante la prochaine fois, si tu es un Einstein en herbe, et que tu touches sérieux en mathématiques et physiques, mais sérieux, je te dis, je te propose deux PDF qui te combleront.

- pour aller au premier PDF de 95 pages de formules et autres, [clique ici](#)
- pour aller au deuxième PDF de 348 pages avec, encore plus de formules et d'explications, [clique ici](#)

Et, à tes souhaits.....

La prochaine fois, nous explorerons la célèbre formule  $E=MC^2$ , dans la plus grande simplicité cela va sans dire.

Et je te garantie que cette partie te révélera des sacrées surprises !! Tu n'en croiras pas tes mirettes, paupiette !!

En attendant, n'oublie plus jamais que le temps n'est plus le même selon le référentiel dans lequel on se trouve.

A la prochaine !!!



Professeur Têtenlair