

La relativité restreinte

Relativité
restreinte

Comprendre

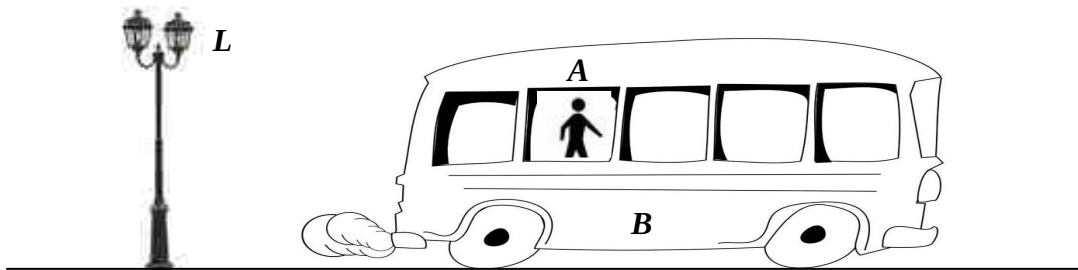
I. Les postulats d'Einstein

I.1 Insuffisance de la mécanique classique

En mécanique newtonienne, les vitesses s'additionnent lors d'un changement de référentiel. Ce sont les *transformations de Galilée* qui s'appliquent et qui conduisent à la loi classique d'additivité des vitesses :

$$\vec{v}_{A/L} = \vec{v}_{A/B} + \vec{v}_{B/L}$$

↓ Figure 1 : Composition de vitesses



Si $v_{A/B} = 1,0 \text{ m/s}$ et si $v_{B/L} = 10 \text{ m/s}$
Alors $v_{A/L} = v_{A/B} + v_{B/L} = 10 + 1,0 = 11 \text{ m/s}$

En réalité, cette loi d'additivité (transformations de Galilée), qui semble pourtant logique, ne peut pas l'être car, en supposant qu'un « superbis » (SB) avance à $250\,000 \text{ km/s}$ et qu'un « superhomme » (SA) avance à l'intérieur du superbis à $100\,000 \text{ km/s}$ vers l'avant, la vitesse de SA par rapport à la lampe L (référentiel terrestre) serait supérieure à la vitesse de la lumière :

$$\begin{aligned} v_{SA/L} &= v_{SA/SB} + v_{SB/L} \\ &= 250\,000 + 100\,000 = 350\,000 \text{ km/s. Ce résultat est impossible car } v_{SA/L} > c \end{aligned}$$

Ainsi la véritable loi d'additivité des vitesses (dans le cas où les vecteurs vitesses ont même direction) est :

$$v' = \frac{v + u}{1 + \frac{v \times u}{c^2}}$$

(transformations de Lorentz)

Ainsi, la vitesse réelle dans le référentiel terrestre de l'homme marchant vers l'avant du bus est :

$$v_{A/L} = \frac{v_{A/B} + v_{B/L}}{1 + \frac{v_{A/B} \times v_{B/L}}{c^2}} = \frac{1 + 10}{1 + \frac{1 \times 10}{(3,0 \times 10^8)^2}} = 10,999\,999\,999\,999\,998\,655 \dots \text{ m/s}$$

Questions :

- Est-il nécessaire d'utiliser les transformations de Lorentz dans le cas de vitesses classiques ? Justifier.
- Déterminer, dans le référentiel terrestre, la vitesse réelle du « superhomme » $v_{SA/L}$.
- Ce résultat est-il acceptable dans le cadre de la physique actuelle ?

Conclusion :

Les lois de la mécanique de Galilée et de Newton ne sont qu'une simplification des véritables lois physiques, et ne sont donc plus applicables dans certaines situations comme dans le cas de **très grandes vitesses dites relativistes** ($v > 0,1 \times c$)

I.2 Les postulats de la relativité restreinte

En 1905, Albert Einstein élabore sa théorie de la relativité restreinte qui repose sur deux postulats :

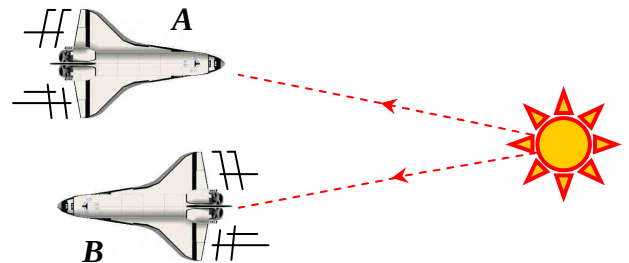
Postulat 1 :

Les lois de la physique s'expriment de la même façon dans tous les référentiels galiléens.

Postulat 2 :

La vitesse de la lumière dans le vide, notée c , est la même dans tous les référentiels galiléens.

- Elle ne dépend donc pas du mouvement de la source lumineuse
- Elle est invariante dans tout changement de référentiel galiléen.



↑ Figure 2 :

Pour les deux navettes A et B la vitesse des photons venant de l'étoile est rigoureusement la même.

A noter :

- Un postulat est une affirmation non démontrée servant de base à une théorie.
- La vitesse de la lumière dans le vide est strictement égale à $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$

Conclusion :

Il existe une vitesse limite, égale à la célérité c de la lumière dans le vide, qui ne peut être dépassée par aucun signal ni particule.

Cette vitesse ne peut être atteinte que par des particules de masse nulle appelées luxons (photons, gravitons...)

II. La relativité du temps

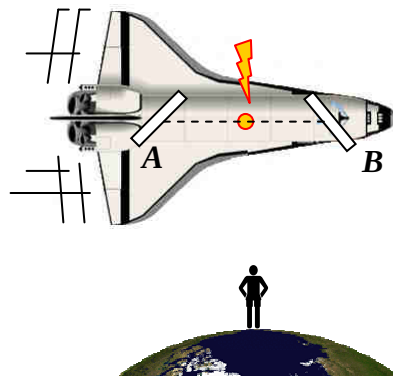
II.1 Caractère relatif du temps

Les transformations de Galilée, caractérisant la mécanique de Newton, indiquent que le temps est une grandeur absolue. Ainsi, le temps qui s'écoule dans la navette (figure 3) en mouvement par rapport à l'observateur terrestre est le même (et donc s'écoule à la même vitesse) que le temps du pilote de la navette.

Or les postulats de la relativité restreinte imposent d'abandonner cette conception comme le démontre l'expérience ci-dessous :

Définition :

Un événement est un fait se produisant en un point d'un référentiel et à un instant donné.



↑ Figure 3 :

Événements simultanés... ou pas.

Considérons l'évènement suivant :

un éclair se produit au milieu de la navette se déplaçant à grande vitesse par rapport au référentiel terrestre.

- Dans le référentiel de la navette, les deux éclairs arrivent simultanément sur les miroirs A et B vu que la vitesse de la lumière est une constante dans tous les référentiels galiléens.
- Pour l'observateur sur Terre, vu que la navette se déplace par rapport au référentiel terrestre, la lumière atteindra le miroir A un peu avant le miroir B car la vitesse de la lumière étant finie, le miroir A avancera avec la navette vers le lieu du flash pendant le temps nécessaire à la lumière pour lui parvenir, alors que le miroir B se sera éloigné d'autant.

Conclusion :

Si pour le pilote les deux miroirs s'illuminent en même temps, ceci n'est plus vrai pour l'observateur terrestre.

La simultanéité est donc une notion relative, de même que le temps.

II.2 Temps propre et temps mesuré

Définition :

Le temps propre (ou durée propre) noté ΔT_0 est la durée séparant deux événements ayant lieu au même endroit dans un référentiel galiléen noté R .

Cette durée est mesurée par une horloge fixe dans R .

Définition :

Le temps mesuré (ou durée mesurée) noté $\Delta T'$ est la durée séparant deux événements mesurée par une horloge fixe dans un référentiel galiléen noté R' en mouvement par rapport au référentiel galiléen R dans lequel on mesure le temps propre.

Relativité du temps

Considérons un voyageur dans sa navette spatiale (**R**) se déplaçant à $v = 0,80 \times c$ par rapport à la Terre (**R'**) vers une étoile située à $L' = 4,0$ années lumières (a.L.) de la Terre.

Le temps propre ΔT_0 du voyageur dans la navette est alors lié au temps $\Delta T'$ d'un observateur sur Terre par la relation :

$$\Delta T' = \gamma \times \Delta T_0$$

avec

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

γ est le facteur de Lorentz ($\gamma \geq 1$)

Lorsque le voyageur vieillit de dix ans par exemple, il s'écoule sur Terre :

$$\Delta T' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \times \Delta T_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,80c}{c}\right)^2}} \times 10 = 1,6 \times 10 = 16 \text{ ans} \quad (\gamma = 1,6)$$

Conclusion :

Il y a "dilatation" du temps pour un objet en mouvement par rapport à un observateur fixe.

A noter :

D'après le premier postulat d'Einstein, ce qui est vrai dans le référentiel du voyageur l'est aussi dans le référentiel de la Terre. Ainsi, si pour le voyageur c'est la Terre qui s'éloigne à la vitesse v , pour un observateur sur Terre, c'est la navette qui s'éloigne à la vitesse v de sorte que le temps propre sur Terre s'écoule moins vite que le temps mesuré dans la navette... Lorsqu'il s'écoule 10 ans sur Terre, la durée mesurée dans la navette est de 16 ans !

Cette apparente contradiction est illustrée par le « paradoxe des jumeaux » de Paul Langevin (1911). (paradoxe qui n'en est pas vraiment un car il a été résolu la même année par Einstein)

Contraction des longueurs

Vu de la Terre, le voyageur va mettre, pour atteindre cette étoile, une durée : $\Delta T' = \frac{L'}{v} = \frac{4,0 \text{ aL}}{0,8 c} = 5,0 \text{ ans}$

Or dans la navette, il se sera alors écoulé : $\Delta T_0 = \frac{\Delta T'}{\gamma} = \frac{5,0}{1,6} = 3,1 \text{ ans}$

Le voyageur ne va donc vieillir que de 3,1 ans pour atteindre l'étoile.

Ainsi la distance entre la Terre et cette étoile s'est contractée sous l'effet de la vitesse du voyageur.

Pour le voyageur, la distance parcourue jusqu'à l'étoile est donc :

$$L_0 = 0,80c \times 3,1 \text{ ans} = 2,5 \text{ aL}$$

$$\text{On a alors : } L' = \gamma \times L_0 \Leftrightarrow L_0 = \frac{L'}{\gamma}$$

Conclusion :

La distance Terre-étoile s'est contractée d'un facteur γ pour le voyageur.

A noter :

Si la vitesse du voyageur par rapport à la Terre est égale à c , la distance se contracte en un point et le déplacement devient instantané ! Pour éviter ce paradoxe, la nature semble interdire à tout corps possédant une masse de voyager à la vitesse de la lumière.

Quant aux luxons, ils ne possèdent pas de temps propre.

