

# Temps et relativité restreinte

## Compétences

- Savoir que la vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiel galiléen. En connaître des tests expérimentaux. Postulat de Einstein.
- Savoir définir la notion de temps propre
- Exploiter la relation entre durée propre et durée mesurée.
- Savoir expliquer la dilatation des durées et en connaître des preuves expérimentales
- Extraire et exploiter des informations relatives à une situation concrète où le caractère relatif du temps est à prendre en compte.

## Plan

### 1- Invariance de la vitesse de la lumière

- 1.1- Loi de composition des vitesses
- 1.2- Postulat de Einstein
- 1.3- Preuves expérimentales

### 2- Référentiels et horloges

### 3- Relativité

- 3.1- La relativité restreinte
- 3.2- Relativité du temps
- 3.3- Preuve expérimentale

### 4- Conclusion

# 1- Invariance de la vitesse de la lumière

## 1.1- Loi de composition des vitesses

En physique classique :

Un passager marche à  $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  dans un train qui lui-même roule à  $42\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , dans le même sens par rapport au sol.

Le passager a donc une vitesse de  $44\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  par rapport au sol. C'est la loi de composition des vitesses instaurée depuis Galilée.

$$\vec{v}_{\text{passager/sol}} = \vec{v}_{\text{passager/train}} + \vec{v}_{\text{train/sol}}$$

**La vitesse du passager dépend du référentiel** que l'on choisit : soit le train, soit le sol

Imaginons maintenant, que ce passager court à la vitesse de  $200\,000\text{km/s}$  dans un train roulant lui-même à  $200\,000\text{km/s}$ , et ce toujours dans le même sens par rapport au sol. On serait tenté de dire que le passager avance à une vitesse de  $400\,000\text{km/s}$  par rapport au sol.

Le passager avance toujours moins vite que la vitesse de la lumière soit  $300\,000\text{km/s}$ . La vitesse de la lumière est une vitesse limite. Rien ne peut la dépasser. On peut pas aborder ce problème en mécanique classique.

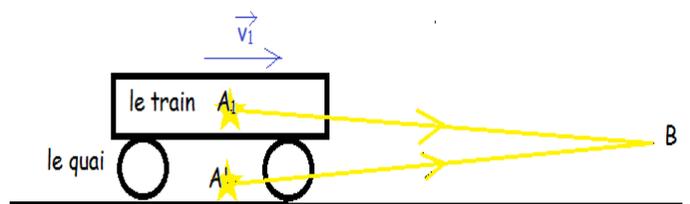
## 1.2- Postulat de Einstein

Prenons l'exemple maintenant d'une personne fixe dans le train qui envoie un éclair lumineux à l'instant  $t_1$  d'un point  $A_1$ . Le train se déplace à une vitesse  $v_1$ . Au **même instant** on envoie un éclair d'un point  $A'$  du quai de la gare. Un observateur est placé en un point  $B$  tel que  $A_1B = A'B$ . La célérité de la lumière est  $c = 3,00 \times 10^8 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . L'observateur reçoit-il les éclairs en même temps? Eh oui à l'instant  $t_2$  ! Cette constatation est-elle en accord avec la loi de composition des vitesses? Eh non. Pourquoi?

Si il y avait composition des vitesses alors la célérité de l'éclair lumineux dans le train serait:  $v = v_1 + c > c$  !

L'observateur recevrait l'éclair envoyé du train **avant** celui envoyé du quai ( $A'B = A_1B$ ). Ce n'est pas le cas.

**Animation:** [invariance de la vitesse de la lumière dans le cas des étoiles doubles \(Serge Bertorello\)](#)



**Einstein en 1905 énonce le postulat de l'invariance de la célérité de la lumière:**

La **célérité** de la lumière ne **dépend pas du référentiel d'étude**. Elle est la même dans tous les référentiels (dans le vide la célérité vaut  $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ )

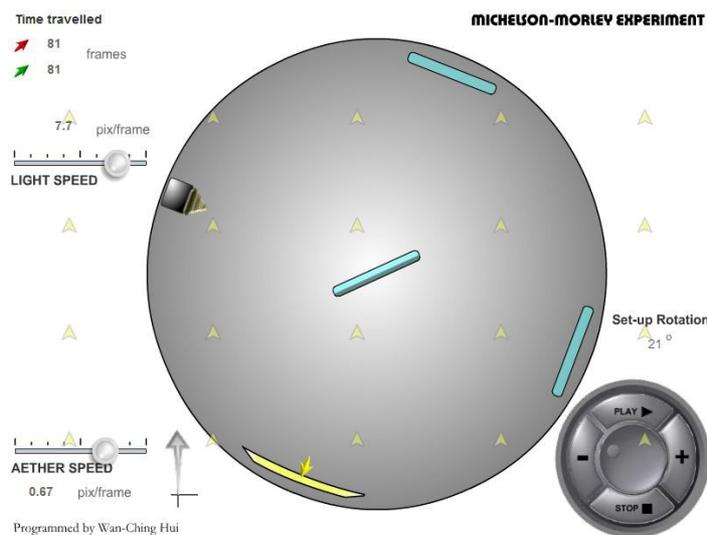
<http://serge.bertorello.free.fr/optique/vitesse/doublevar.gif>

### 1.3- Preuves expérimentales

Plusieurs expériences ont permis de révéler cette invariance :

- Arago (1810) déviation du faisceau lumineux provenant d'une étoile à travers un prisme. (indépendant du déplacement de l'étoile par rapport à la Terre)
- L'expérience de Morley et Michelson (fin XIXème), grâce à leur interféromètre, avait mis en évidence l'invariance de la célérité de la lumière. Qu'elle se propage dans la direction du mouvement de la Terre ou dans la direction perpendiculaire à celle-ci la célérité de la lumière est la même. [Animation: expérience de Michelson et Morley](http://serge.bertorello.free.fr/optique/vitesse/vitesse.html)  
[http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/more\\_stuff/flashlets/mmexpt6.htm](http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/more_stuff/flashlets/mmexpt6.htm)
- expérience d'Alväger (1964) (désintégration des mésons  $\pi^0$  dont la vitesse est de  $v = 0,999c$ , les photons émis lors de la désintégration ont une vitesse  $c$  et non  $c+v$ )

### Michelson-Morley Experiment



## 2- Référentiels et horloges

Un **événement** est un fait qui se produit en un endroit précis dans l'espace et à un instant donné : événement 1  $E_1 (x_1, y_1, z_1, t_1)$  et événement 2  $E_2 (x_2, y_2, z_2, t_2)$ .

Le référentiel galiléen dans lequel deux événements  $E_1$  et  $E_2$  ont lieu au même endroit de l'espace est appelé **référentiel propre**. Pour  $E_1$  et  $E_2$

L'horloge qui lui est associée mesure un intervalle de temps entre ces deux événements appelé la **durée propre** entre  $E_1$  et  $E_2$ .

# 3- Relativité

## 3.1- La relativité restreinte

- \* Le temps est une grandeur mesurée par une horloge
- \* En physique classique, celle de Galilée et Newton, le temps est absolu : il s'écoule indépendamment des conditions extérieures et de la même façon pour tout observateur, qu'il soit en mouvement ou pas.
- \* Selon la théorie de la relativité restreinte, l'écoulement du temps dépend du référentiel. La durée séparant deux événements dépend donc du référentiel choisi.

## 3.2- Relativité du temps

Exemple l'éclair dans une horloge à lumière embarquée dans un train de vitesse  $v$ . Une lumière émise dans un tube entre deux miroirs

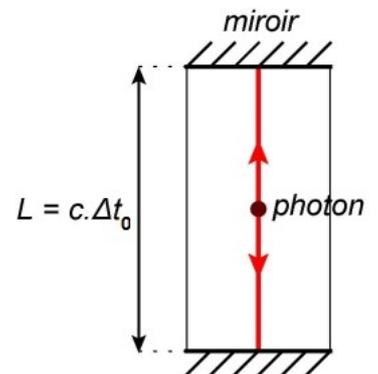
\*\*\*Regardons ce qui se passe dans l'horloge elle-même.

L'événement E1 : est l'émission de la lumière.

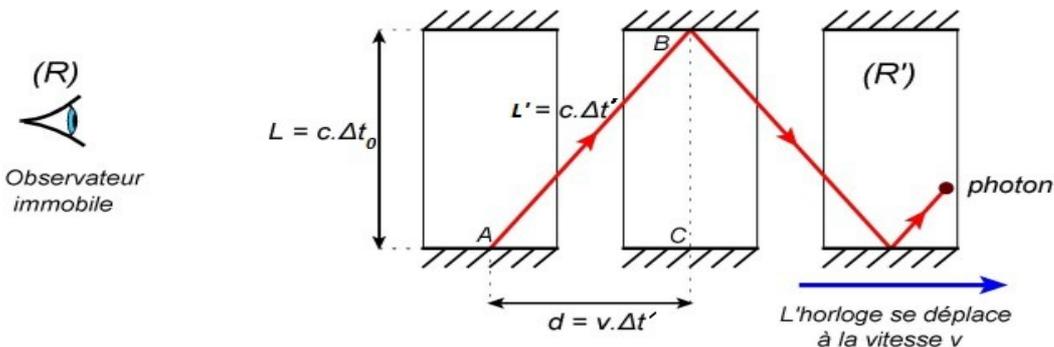
L'événement E2 est la réception de la lumière après une traversée.

La durée propre entre ces deux événements est  $\Delta t_0$

La distance parcourue par la lumière pour un aller est  $L = c \cdot \Delta t_0$



\*\*\*Regardons ce qui se passe dans le référentiel terrestre



La durée dans le référentiel entre ces deux événements est  $\Delta t'$

La distance parcourue par la lumière pour aller de A vers B est  $L' = c \cdot \Delta t'$

### Approche qualitative :

La distance  $L'$  est plus grande que  $L$ .

donc  $c \cdot \Delta t' > c \cdot \Delta t_0$

L'invariance de la vitesse de la lumière quelque soit le référentiel impose donc que  $\Delta t' > \Delta t_0$

c'est la **dilatation des durées**

### Approche quantitative :

Remarque : la durée propre  $\Delta t_0$  est toujours plus petite que toutes les autres durées.

\*\*\* Que se passe-t-il lorsque  $v \ll c$  ?? On retrouve l'écoulement du temps comme en physique classique

Ex n°20-25 ( les jumeaux de Langevin) p199

### 3.3- Preuve expérimentale

Les muons  
activité 3 p 188

GPS : ex n°31 p203

## 4- Conclusion

On retiendra que :

Le **temps propre** ou durée propre  $\Delta t_0$  est la durée d'un événement mesurée par une horloge. Cette horloge fixe est placée dans le référentiel galiléen où se déroule l'événement.

Le **temps** ou durée **impropre**  $\Delta t'$  est la durée d'un événement mesurée dans un référentiel autre que celui où se déroule l'événement.

$\Delta t_0$  Et  $\Delta t'$  sont lié par la relation suivante:

$$\Delta t' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \Delta t_0 = \gamma \cdot \Delta t_0$$

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

Dans le cas où  $v$  est faible devant  $c$  on peut négliger cette dilatation du temps. Le temps propre est peu différent du temps impropre. La mécanique classique et relativiste se rejoignent

Ce phénomène de dilatation du temps a été observé dans les satellites GPS. Les horloges embarquées dans le satellite sont retardées, il faut les synchroniser avec celle sur Terre.

### Application :

Un astronaute Bob de 32 ans part en voyage dans une fusée avec une vitesse  $v = 0,99.c$  dans l'espace. Il laisse une femme et un enfant de 10 ans, le petit Pierre. Il s'écoule une durée propre  $\Delta T_0 = 5,0$  ans avant que Bob ne revienne sur Terre. Quelle durée impropre  $\Delta T'$  s'est écoulée sur Terre? Quel est alors l'âge de Pierre?