Chapitre 8 : Temps et relativité restreinte

Compétences exigibles au baccalauréat :

- Savoir que la vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels galiléens.
- Définir la notion de temps propre.
- Exploiter la relation entre durée propre et durée mesurée.
- Extraire et exploiter des informations relatives à une situation concrète où le caractère relatif du temps est à prendre en compte.

I. ACTIVITE INTRODUCTIVE :

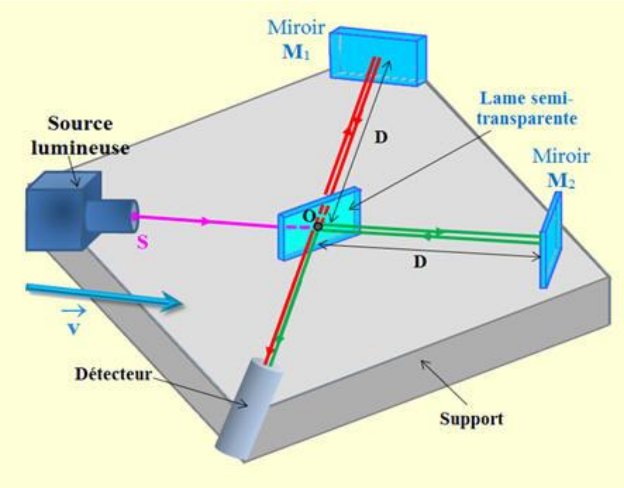
Vidéo d'Arte : La relativité restreinte

https://www.youtube.com/watch?v=xxlwjnmb98Y

II. POSTULAT : INVARIANCE DE LA LUMIERE DANS LE VIDE :

Vidéo : Expérience de Michelson et Morley :

https://www.youtube.com/watch?v=ETLG5SLFMZo



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

$$c = 3,00 \times 10^8 m.s^{-1}$$

Remarque : C'est une remise en cause de la mécanique classique où la vitesse dépend du référentiel d'étude.

III. Relativite du temps :

Un évènement est un phénomène objectif observable, c'est un fait se produisant à un endroit donné.

Exemples : un éclair, un claquement de main, une explosion, une impulsion lumineuse, …

Pour repérer un évènement, il faut choisir un référentiel et lui attribuer des coordonnées spatio-temporelle (x, y, z, t).

Le temps est une grandeur mesurée par une horloge.

Cas de la physique classique (Galilée et Newton) :

- Le temps est absolu. Il est le même dans tout le référentiel et dans tous les référentiels.
- Le temps s'écoule indépendamment des conditions extérieures.
- Le temps s'écoule de la même façon pour tout observateur qu'il soit immobile ou en mouvement par rapport à un référentiel galiléen.

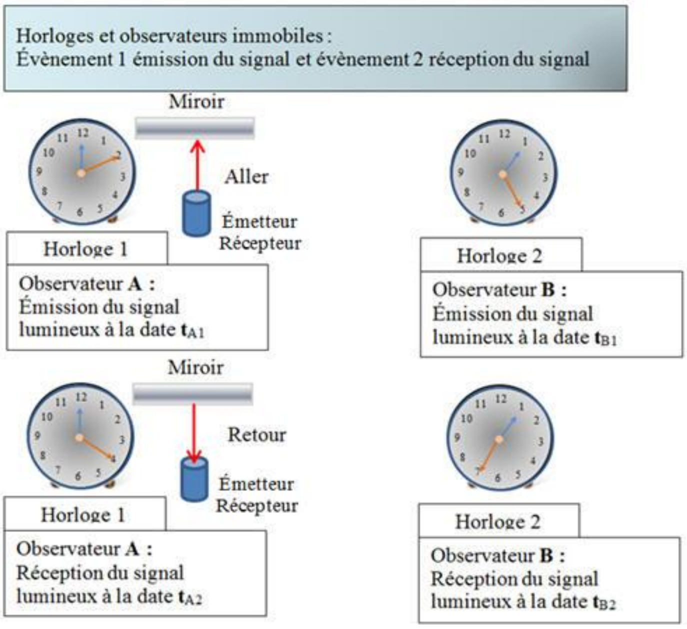
Cas de la relativité restreinte :

- Le temps dépend du référentiel d'étude.
- Le temps ne s'écoule pas de la même façon pour tout observateur.
- La durée séparant deux évènements dépend du référentiel d'étude.

Illustration :

Cas des horloges immobiles :

Deux horloges immobiles l'une par rapport à l'autre mesurent les mêmes durées.

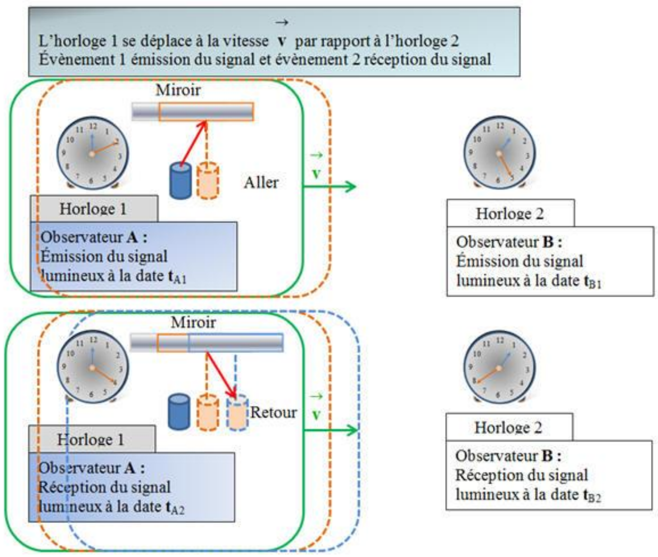


En conséquence : $t_{A2} - t_{A1} = t_{B2} - t_{B1}$

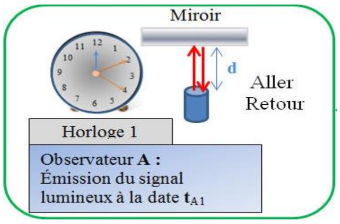
Cas d'horloge en mouvement par rapport à une autre horloge :

Une horloge en mouvement et une horloge fixe ne mesurent pas les mêmes durées entre les évènements 1et 2.

On considère que le référentiel A se déplace à la vitesse $\vec{v}$ par rapport au référentiel B.



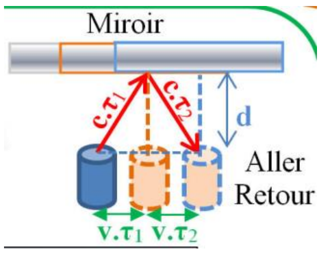
Dans le référentiel A :



$$\Delta t_A = t_{A2} - t_{A1} = \frac{2\,d}{c}$$

Dans le référentiel B :

L'observateur B est immobile et voit le référentiel (et l'horloge) se déplacer à la vitesse $\vec{v}$



À l'aller, le signal arrive sur le miroir au bout de la durée τ_1 et met la durée τ_2 pour le retour.

Pendant la durée τ_1, l'ensemble s'est déplacé de la distance ($v . \tau_1$)

En utilisant Pythagore, on peut écrire que :

$(c . \tau_1)^2 = d^2 + (v . \tau_1)^2$

De même pour le retour, on écrit :

$(c . \tau_2)^2 = d^2 + (v . \tau_2)^2$

On tire de ces expressions :

$$\tau_1 = \frac{d}{\sqrt{c^2 - v^2}} \text{ et } \tau_2 = \frac{d}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

En conséquence :

$$\Delta t_B = t_{B2} - t_{B1} = \tau_1 + \tau_2$$

$$\Delta t_B = \frac{2\,d}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

$\Delta t_B \neq \Delta t_A$

On peut calculer le rapport $\Delta t_B / \Delta t_A$

$$\frac{\Delta t_B}{\Delta t_A} = \frac{2\,d}{\sqrt{c^2 - v^2}} \cdot \frac{c}{2\,d} = \frac{c}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}}$$

$$\Delta t_B = \Delta t_A \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}}$$

On note :

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

avec $\gamma \geq 1$

On remarque que : $\Delta t_B \geq \Delta t_A$

Il ne faut pas se laisser déstabiliser par ce long raisonnement. Je cherche à vous montrer que la formule que vous devez savoir utiliser ne vient pas de nulle part. On la redémontre ici dans ce cas relativement simple.

Notion de temps propre ou durée propre :

Durée propre (ou temps propre) :

Le temps propre, ou durée propre, ΔT_0 est la durée séparant deux événements ayant lieu au même endroit dans un référentiel galiléen (R). Cette durée ΔT_0 est mesurée par une horloge fixe, proche des deux évènements dans le référentiel (R).

durée mesurée (ou temps mesuré) :

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

Dans le référentiel (R), on mesure la durée propre.

Dans le référentiel (R'), on mesure la durée mesurée.

Le référentiel (R') est en mouvement par rapport au référentiel (R).

Relativité du temps :

Les durées $\Delta T'$ et ΔT_0 sont liées par la relation de dilatation temporelle :

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

Le coefficient γ (gamma), sans unité, est donné par la relation :

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

γ : grandeur sans unité, $\gamma \geq 1$

v : valeur de la vitesse relative d'une horloge par rapport à l'autre, unité : $m.s^{-1}$

c : valeur de la vitesse de la lumière dans le vide : unité : $m.s^{-1}$

Ces deux formules ne sont pas à connaitre par cœur mais il faut savoir s'en servir

Remarques :

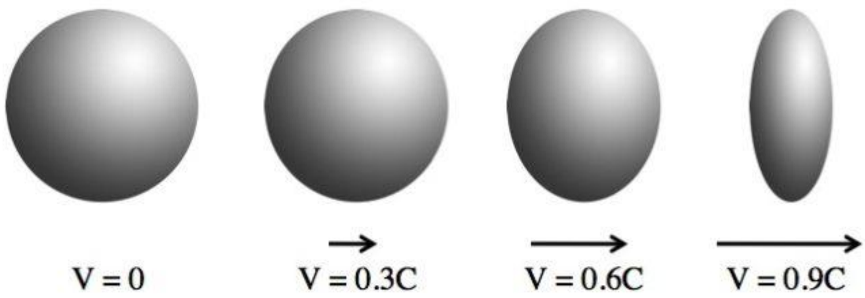
Deux horloges en mouvement relatif ne mesurent pas la même durée entre deux évènements

$\Delta T' \geq \Delta T_0$

C'est le phénomène de dilatation des durées.

Une horloge qui se déplace par rapport à un observateur bat plus lentement qu'une horloge immobile par rapport à l'observateur.

<u>Remarque :</u> De la même manière, mais c'est hors programme, on pourrait montre qu'un phénomène de contraction des longueurs s'observe entre ces deux référentiels. Un objet qui se déplace par rapport à un observateur apparait plus petit qu'un objet immobile par rapport à l'observateur.



<u>Application :</u>

On considère une sonde spatiale se déplaçant à la vitesse v = 1,0 x 10^5 $m.s^{-1}$ par rapport à un référentiel terrestre supposé galiléen.

Quel est l'écart relatif entre la durée propre et la durée mesurée dans le référentiel terrestre.

$$\frac{\Delta T' - \Delta T_0}{\Delta T'} = 1 - \frac{\Delta T_0}{\Delta T'} = 1 - \frac{1}{\gamma}$$

$$\frac{\Delta T' - \Delta T_0}{\Delta T'} = 1 - \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$\frac{\Delta T' - \Delta T_0}{\Delta T'} \approx 1 - \sqrt{1 - \frac{\left(1,0 \times 10^5\right)^2}{\left(3,0 \times 10^8\right)^2}}$$

$$\frac{\Delta T' - \Delta T_0}{\Delta T'} \approx 5,6 \times 10^{-8}$$

<u>Conclusion :</u> Lorsque la vitesse v << c, la dilatation de temps est imperceptible.

IV. PHYSIQUE CLASSIQUE ET RELATIVITE RESTREINTE :

1) La vitesse v est petite devant c :

Le postulat d'Einstein est compatible avec les lois de la mécanique classique de Galilée et Newton.

Si $v \ll c$, alors $\gamma \approx 1$ et $\Delta T' \approx \Delta T_0$

Dans ce cas, la mesure de la durée est indépendante du référentiel choisi.

Dans le cas où la valeur de la vitesse relative v entre les horloges est faible par rapport à la valeur de la vitesse de propagation de la lumière dans le vide c, la dilatation des durées n'est plus perceptible, mais l'écart peut être mesuré par les horloges atomiques actuelles.

Exemple :

La mesure du temps dans un système de localisation (GPS) est d'une telle précision que la relativité du temps doit être prise en compte. La bonne marche d'un tel système valide la théorie d'Einstein.

Sans synchronisation, les horloges embarquées dans les satellites de localisation (GPS) seraient décalées par rapport à l'horloge terrestre.

2) La vitesse v est voisine de c :

Les physiciens des particules étudient des particules dont les vitesses sont proches de la vitesse de la lumière dans le vide. On parle alors de particules relativistes.

La mécanique classique est dans ce cas totalement inadaptée pour l'étude des particules relativistes.

En physique des particules, la relativité restreinte fait partie de l'expérience quotidienne.

Exemple :

Des particules instables, présentes dans les accélérateurs de particules (CERN) peuvent être observées pendant des durées très supérieure à leur durée de vie propre. C'est une preuve expérimentale de la dilatation des durées.

Exercices en autonomie : 1 à 4 p 217-218
Exercice 9 – 11- 15 – 18 – 20 – 26 p 219
Faire le point avec l'exercice type bac et la fiche BAC p 227 - 228