

Partie 3 – Chapitre 2 : mesure du temps et relativité restreinte

1. Comment mesure-t-on les longueurs et les durées ?

1.1. Repère et référentiel.

- Un **référentiel** est un objet fixé par la pensée par rapport auquel les mouvements sont décrits.
- Un **repère** est un ensemble d'axes et une origine permettant de localiser un point quelconque dans l'espace par ses coordonnées.
- Il est possible de **changer de repère** tout en conservant **le même référentiel**.
Le repère cartésien et le repère de Frénet sont deux repères différents dans le référentiel géocentrique.

1.2. horloge et durée.

- Une **horloge** est un **système oscillant** dont la **période** d'oscillation, appelée période propre, est connue.
- La **durée** est mesurée par une horloge. La valeur d'une durée est donc égale à **un multiple** de la période de l'horloge utilisée pour la mesure.
- Un système mécanique oscillant dissipe de l'énergie par frottement sous forme d'énergie thermique. Il en résulte une variation de sa période d'oscillation et donc une incertitude sur la mesure de la durée.
- Lors d'une transition électronique, le passage de l'électron d'une couche électronique à une autre ne dissipe pas d'énergie. **L'onde électromagnétique émise possède une période bien définie**. Une **horloge atomique** repose sur ce principe.
- La **seconde**, étalon de mesure du temps, est ainsi **un multiple de la période de l'onde électromagnétique émise par un atome de césium 133 lorsqu'un de ses électrons change de niveau d'énergie**.

1.3. Temps et mécanique newtonienne.

- Dans le cadre de la mécanique newtonienne, **la durée mise par un mobile quelconque pour aller du point A au point B est indépendante du référentiel choisi**.
- En revanche, **la distance parcourue par le mobile pour aller du point A au point B dépend du référentiel choisi**.

2. Relativité de la simultanéité et de la durée.

2.1. Le postulat d'Einstein d'invariance de la vitesse de la lumière.

- **La vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels galiléens.**
Cela signifie que la vitesse de la lumière est identique dans les situations suivantes :
 - la source se déplace à vitesse constante par rapport à l'observateur.
 - un observateur A se déplace à vitesse constante par rapport à un observateur B.

Par exemple, dans un train qui roule à une vitesse de 100 km/h par rapport au quai, un voyageur qui se déplace à 5 km/h par rapport au train a une vitesse de 105 km/h par rapport au quai. Par contre, la lumière se propage à $3,0 \cdot 10^5$ km/h par rapport au quai et par rapport au train.

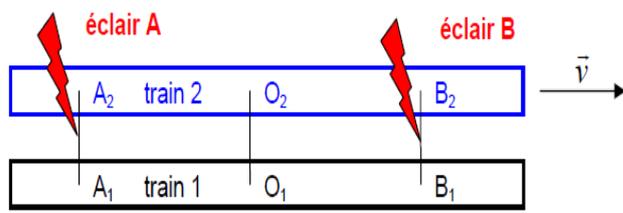
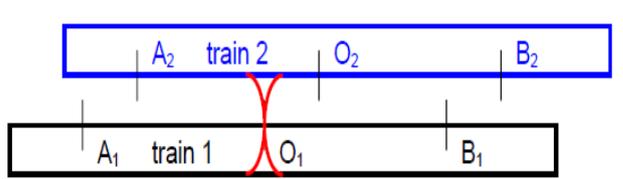
- **Le postulat d'Einstein a été validé par de nombreux tests expérimentaux :**
 - **expérience de Michelson et Morley en 1887** : la vitesse de la lumière est la même dans la direction de déplacement de la Terre par rapport au Soleil aussi bien que dans la direction perpendiculaire.

Partie 3 – Chapitre 2 : mesure du temps et relativité restreinte

- **expérience d'Alvagler en 1964** : la vitesse de la lumière est la même, qu'elle soit émise par des particules se déplaçant à des vitesses voisines de la lumière (0,99 c) ou par les mêmes particules immobiles.

2.2. La relativité de la simultanéité.

- **Un événement** est un phénomène qui se produit en un lieu donné et à un instant donné. Il est repéré par un point M de coordonnées $M(x,y,z,t)$.
- Considérons un référentiel (R) et un référentiel (R') en mouvement rectiligne uniforme par rapport à (R). Alors **deux événements simultanés par rapport à (R) ne sont pas nécessairement simultanés par rapport à (R')**.
C'est une conséquence du postulat d'Einstein d'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide.

<p>Situation initiale : deux éclairs (événements) se produisent au même instant dans le référentiel du quai. Le train 1 est immobile à quai. Un observateur O_1 se trouve au milieu du train 1. Le train 2 se déplace à une vitesse v par rapport au train 1 dans la direction AB. Un observateur O_2 se trouve au milieu du train 2.</p>	
<p>Situation finale : la lumière des deux éclairs arrive au même instant au point O_1 dans le référentiel du train 1 : les événements sont donc simultanés dans ce référentiel. Cependant, la lumière de l'éclair B arrive avant celle de l'éclair A pour l'observateur O_2 : les événements ne sont pas simultanés dans ce référentiel.</p>	

2.3. La dilatation des durées.

C'est une conséquence similaire de l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide.

Considérons un référentiel galiléen se déplaçant à une vitesse v constante par rapport à un autre référentiel galiléen.

- **La durée propre ΔT_0** est la durée entre deux événements **dans le référentiel où ils arrivent au même lieu, appelé « référentiel propre »**.
- **La durée mesurée $\Delta T'$** est la durée qui s'écoule entre deux événements **dans le référentiel où ces deux événements arrivent à deux endroits différents**.
- **la durée propre ΔT_0 est toujours inférieure à la durée mesurée $\Delta T'$** par un observateur extérieur au "référentiel propre" : $\Delta T' > \Delta T_0$.
C'est le phénomène de « dilatation des durées ».
- Le « facteur gamma » prend des valeurs très différentes de 1 lorsque v est voisin de c : c'est la raison pour laquelle la dilatation des durées ne s'observe pas dans la plupart des situations quotidiennes.

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

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

Partie 3 – Chapitre 2 : mesure du temps et relativité restreinte

Illustration : horloge de lumière.

On considère un rayon lumineux qui part d'une source à un instant t (événement A) dans le référentiel de la source (R'), se réfléchit sur un miroir et rejoint un récepteur solidaire de la source à un instant t' . L'ensemble a un mouvement rectiligne uniforme à la vitesse v par rapport au référentiel du laboratoire (R).

Dans le référentiel de la source (R'), la durée entre les deux événements A et B est :

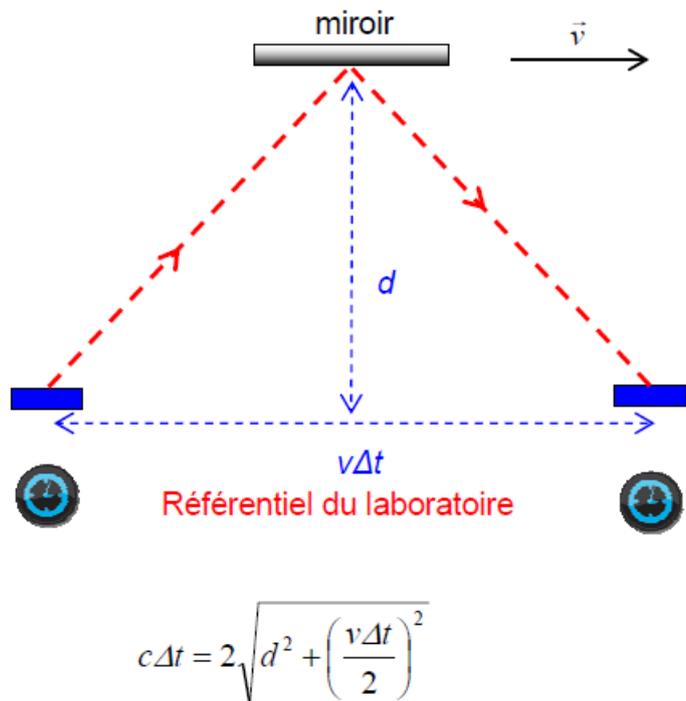
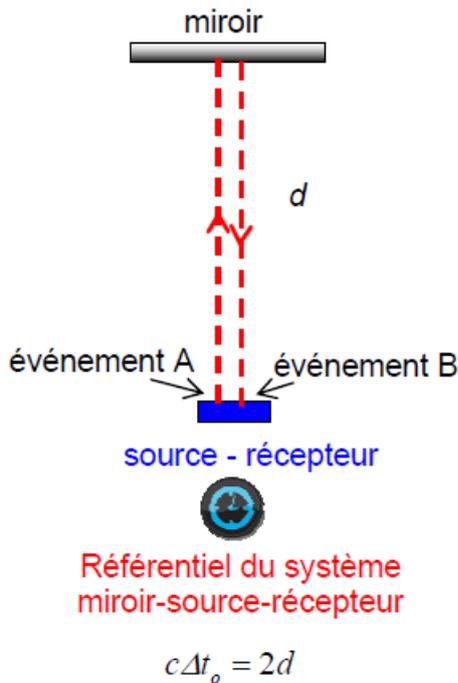
$$\Delta t_0 = t' - t = \frac{2d}{c}$$

C'est la **durée propre** entre les événements A et B.

Dans le référentiel (R) du laboratoire, la durée entre les

$$\text{deux événements A et B est : } \Delta t = t'' - t = \frac{2d}{c} \times \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

C'est la **durée mesurée dans le référentiel (R)** entre les événements A et B : elle est supérieure à la durée propre.



3. Relativité « restreinte » et relativité « générale ».

- La théorie de la relativité restreinte d'Einstein repose sur l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide. Cette théorie généralise la relativité galiléenne du mouvement en affirmant que **les lois physiques sont indépendantes du référentiel choisi pour les décrire, si ces référentiels sont en mouvement rectiligne uniforme les uns par rapport aux autres.** Elle est « restreinte » aux situations où il n'y a pas de champ de gravitation ou s'il peut être négligé.
- Dans la théorie de la relativité générale où le champ de gravitation décrit la structure de l'espace lui-même, les lois physiques ont la même forme **quel que soit le référentiel utilisé et quel que soit son mouvement.** Dans ce cadre théorique, la vitesse de la lumière dépend du champ de gravitation et n'est donc plus invariante.