

THEME 2 : Lois et modèles

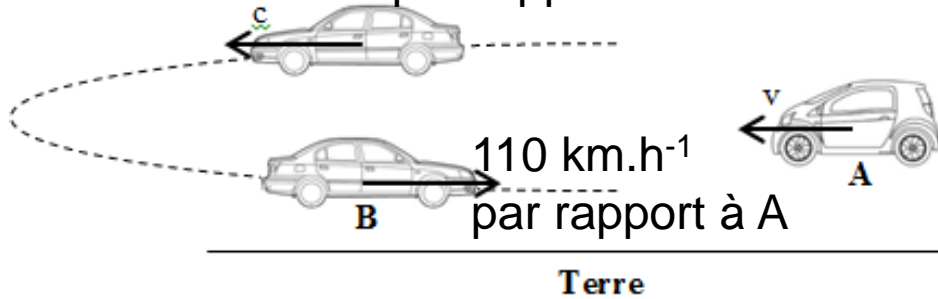
C12 Relativité du temps

- I. De la mécanique classique à la relativité restreinte**
 - 1. Composition des vitesses**

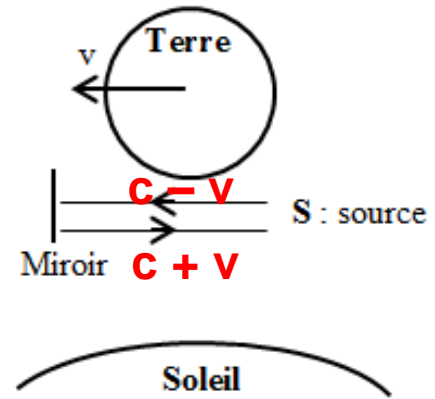
I. De la mécanique classique à la relativité restreinte

1. Composition des vitesses (mécanique classique)

10 km.h⁻¹ par rapport à A



- ☞ Situation 1 : deux voitures sont en mouvement rectiligne uniforme par rapport à la Terre, la voiture A à la vitesse $v = 50 \text{ km.h}^{-1}$ et la voiture B à la vitesse $c = 60 \text{ km.h}^{-1}$. Que vaut la vitesse de la voiture B par rapport à la voiture A quand elle s'éloigne de la voiture A ? $c - v = 10 \text{ km.h}^{-1}$ quand elle se rapproche ? $c + v = 110 \text{ km.h}^{-1}$



- ☞ Situation 2 : par rapport au Soleil, la vitesse de la lumière vaut $c = 300\,000 \text{ km.s}^{-1}$, celle de la Terre $v = 30 \text{ km.s}^{-1}$. La lumière est émise par une source fixée à la Terre, en direction d'un miroir sur lequel elle se réfléchit. Que vaut la vitesse de la lumière par rapport à la Terre quand elle s'éloigne de la Terre ? $c - v$ quand elle se rapproche ? $c + v$

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\frac{G \cdot M_{\text{Soleil}}}{r}} = \\ &= \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 1,989 \cdot 10^{30}}{1,5 \cdot 10^{11}}} = \\ &= 2,97 \cdot 10^4 \text{ m. s}^{-1} \\ &= 29,7 \text{ km. s}^{-1} \end{aligned}$$

THEME 2 : Lois et modèles

C12 Relativité du temps

I. De la mécanique classique à la relativité restreinte

1. Composition des vitesses

2. Insuffisance de la mécanique classique

=> Activité 1 P.244

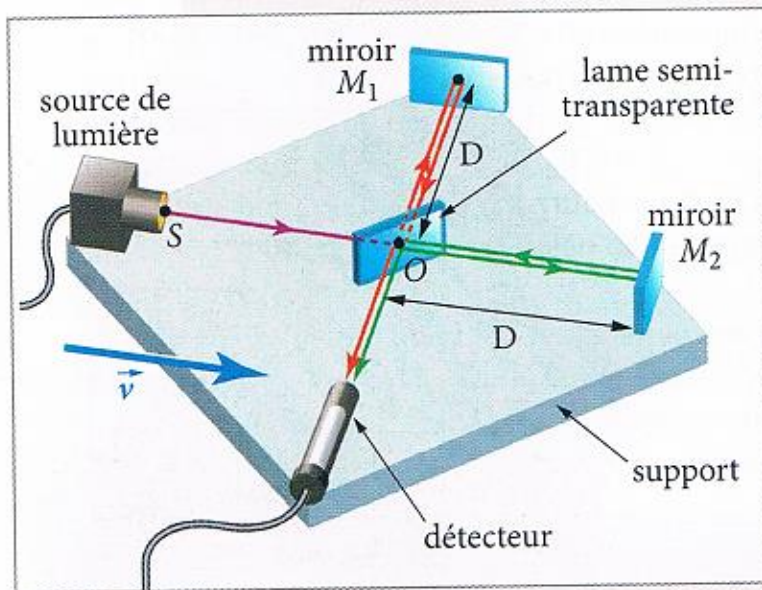
1

La célérité de la lumière, un défi au sens commun

► En cherchant à mesurer l'influence du mouvement de la Terre sur la célérité de la lumière dans le vide, les physiciens du XIX^e siècle ont fait une découverte inattendue.

• Considérons deux voitures dont les compteurs de vitesse affichent $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ pour l'une et $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ pour l'autre : si elles se croisent, leurs passagers voient arriver l'autre voiture à $110 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ alors que si elles se doublent, c'est à $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ que leurs passagers voient l'autre voiture se déplacer. On peut appliquer les mêmes règles de composition (d'addition ou de soustraction) des vitesses si on remplace un véhicule par un signal sonore.

5 • Il en est tout autrement si l'on remplace l'un des mobiles par un signal lumineux. Ainsi, on n'a jamais pu constater que la valeur de la célérité de la lumière dans le vide par rapport à la Terre était influencée par le mouvement de celle-ci dans l'espace. L'expérience la plus connue a été réalisée à partir de 1881 par les physiciens américains Michelson et Morley.



• Le dispositif est schématisé sur la figure ci-contre. La lumière émise par la source S rencontre en O une lame semi-transparente : une partie de la lumière est réfléchi vers le miroir M_1 , l'autre partie traverse la lame en direction du miroir M_2 . Après réflexion en incidence nulle sur les deux miroirs, le même phénomène se produit à nouveau sur la lame. Le détecteur permet l'observation du phénomène d'interférence entre les rayons ayant suivi les deux trajets représentés en rouge et en vert.

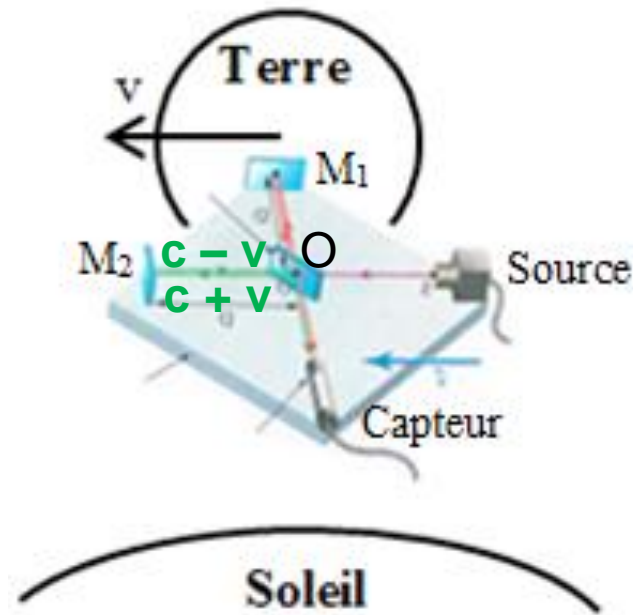
10
15
20

On envisage ici le cas où le support de ce dispositif, fixe sur la Terre, est placé de telle sorte que l'axe SOM_2 soit parallèle à la direction de la vitesse \vec{v} du support par rapport au référentiel héliocentrique (référentiel galiléen). La lumière émise par la source S se propage dans le même sens que \vec{v} de O à M_2 , mais en sens contraire de M_2 à O.

• Notons c la vitesse de propagation de la lumière dans le référentiel héliocentrique. La règle de composition des vitesses devrait permettre d'affirmer que par rapport au support, la lumière effectue le trajet entre O et M_2 à la vitesse $c - v$ à l'aller, et $c + v$ au retour ; la direction OM_1 est normale à \vec{v} , le trajet aller-retour est donc moins affecté par le mouvement. Avec cette hypothèse, la différence τ entre les durées des trajets OM_2O et OM_1O devrait dépendre de v . Dans les conditions décrites, le calcul donne une différence voisine de $\tau = \frac{Dv^2}{c^3}$, D étant la distance $OM_1 \approx OM_2$. Les deux faisceaux interfèrent et bien que la vitesse v (d'environ $30 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$) soit très petite devant c , la figure d'interférence obtenue devrait être affectée d'une façon mesurable par cette différence τ , et dépendre de l'orientation de l'appareil par rapport à \vec{v} , ce qui n'a jamais été observé.

25

Ne pas noter



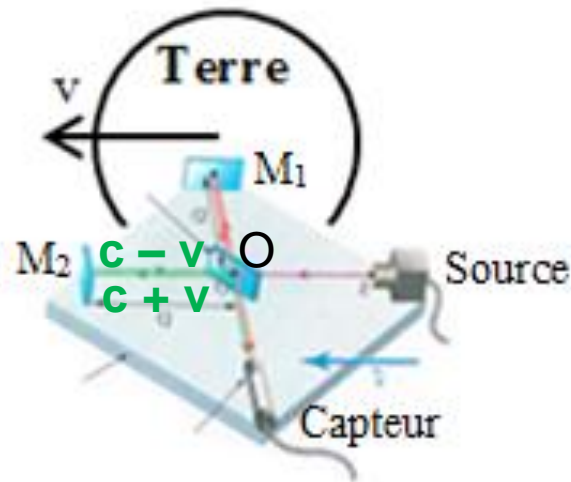
Durée mise par la lumière pour parcourir OM_1 aller-retour, à la vitesse c : $t_1 = \frac{2 OM_1}{c} = \frac{2 D}{c}$

Durée mise par la lumière pour parcourir OM_2 à la vitesse $(c - v)$ à l'aller et à la vitesse $(c + v)$ au retour :

$$t_2 = \frac{OM_2}{c - v} + \frac{OM_2}{c + v} = \frac{2 c D}{c^2 - v^2} = \frac{2 c D}{c^2(1 - \frac{v^2}{c^2})} = \frac{2 D}{c(1 - \frac{v^2}{c^2})}$$

$$t_2 - t_1 = \frac{2 D}{c} - \frac{2 D}{c(1 - \frac{v^2}{c^2})} = \frac{2 D}{c} \left(1 - \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}\right)$$

Ne pas noter



25 OM_1O devrait dépendre de v . Dans les conditions décrites, le calcul donne une différence voisine de $\tau = \frac{Dv^2}{c^3}$.

Durée mise par la lumière pour parcourir OM_1 aller-retour, à la vitesse c : $t_1 = \frac{2 OM_1}{c} = \frac{2 D}{c}$

Durée mise par la lumière pour parcourir OM_2 à la vitesse $(c - v)$ à l'aller et à la vitesse $(c + v)$ au retour :

$$t_2 = \frac{OM_2}{c - v} + \frac{OM_2}{c + v} = \frac{2 c D}{c^2 - v^2} = \frac{2 c D}{c^2(1 - \frac{v^2}{c^2})} = \frac{2 D}{c(1 - \frac{v^2}{c^2})}$$

$$t_2 - t_1 = \frac{2 D}{c} - \frac{2 D}{c(1 - \frac{v^2}{c^2})} = \frac{2 D}{c} \left(1 - \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}\right) \approx \frac{-Dv^2}{c^3} \text{ car } \frac{v^2}{c^2} \text{ est très petit}$$

En mécanique classique, la différence τ entre les durées des deux trajets $\Delta t = t_2 - t_1$ dépend donc

de la vitesse v de la Terre par rapport au Soleil \Rightarrow les franges d'interférences seront donc déplacées en conséquence.

1 Analyser les documents

a. Quel était l'objectif de l'expérience de Michelson et Morley ?

Cette expérience devait permettre de mesurer l'influence du mouvement de la Terre sur la vitesse de propagation de la lumière, mesurée dans le référentiel Terrestre.

b. Vérifier que τ a les dimensions d'un temps et calculer sa valeur. Comparer cette valeur à la période d'une radiation de longueur d'onde dans le vide $\lambda = 500 \text{ nm}$. Justifier l'utilité d'un dispositif d'interférences pour mesurer le décalage attendu.

On prendra pour valeurs numériques : $D = 10 \text{ m}$; $v = 3,0 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

$$\tau = \frac{Dv^2}{c^3} \quad \tau \text{ s'exprime en } \frac{\text{m} \times (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2}{(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^3} = \frac{\text{m}}{\text{m} \cdot \text{s}^{-1}} = \text{s}$$

$$\text{Ou } \dim \tau = \frac{\dim(Dv^2)}{\dim(c)^3} = \frac{\dim D \times (\dim v)^2}{(\dim c)^3} = \frac{\text{L}}{\text{LT}^{-1}} = \text{T}$$

$$\text{Différence de durées de parcours : } \tau = 10 \times (3,0 \cdot 10^4)^2 / (3,0 \cdot 10^8)^3 = 3,3 \cdot 10^{-16} \text{ s}$$

$$\text{Période de la radiation } T = \frac{\lambda}{c} = 500 \cdot 10^{-9} / 3,0 \cdot 10^8 = 1,7 \cdot 10^{-15} \text{ s}$$

Constat : $\tau = 1/5 T$

Un tel décalage temporel

n'est pas directement mesurable. Par contre, il entraîne un décalage du système de franges de

1/5 d'interfrange, ce qui est facilement mesurable.

2 Conclure

a. Quelle propriété de la célérité de la lumière découle de cette expérience ?

D étant la distance $OM_1 \approx OM_2$. Les deux faisceaux interfèrent et bien que la vitesse v (d'environ $30 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$) soit très petite devant c , la figure d'interférence obtenue devrait être affectée d'une façon mesurable par cette différence τ , et dépendre de l'orientation de l'appareil par rapport à \vec{v} , ce qui n'a jamais été observé.

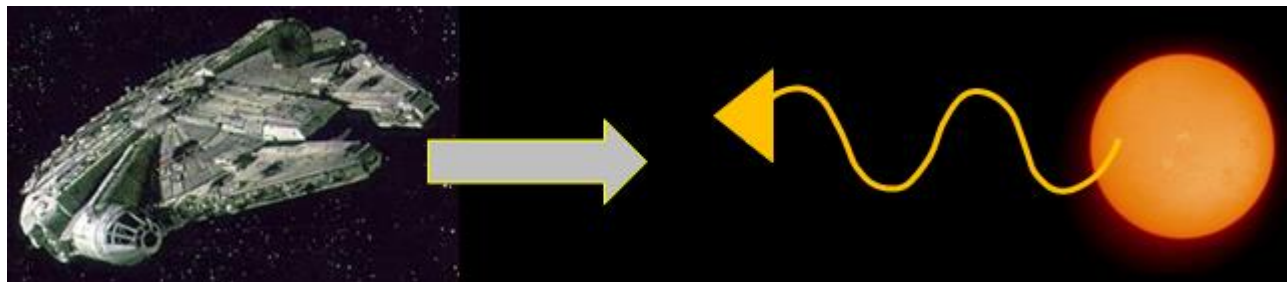
1 *L'expérience de Michelson et Morley.*

Cette expérience montre que la vitesse de la lumière ne dépend pas de la vitesse de la Terre par rapport au Soleil =>

la loi de composition des vitesses ne s'applique pas aux ondes lumineuses ! Elles voyagent à la même vitesse, c , indépendamment de la vitesse de la source.

b. En généralisant le résultat à tout référentiel galiléen, que peut-on dire de la célérité dans le vide de la lumière provenant d'une étoile, pour un occupant d'un vaisseau spatial ultra rapide se déplaçant avec un mouvement rectiligne uniforme par rapport au référentiel héliocentrique ?

Son mouvement ne devrait pas avoir d'influence sur la vitesse de la lumière : le signal se propage à la vitesse c pour le vaisseau.



Tenant compte de ces expériences, **Albert Einstein** publie en **1905** la théorie de la **relativité restreinte**.
(synthèse P.251)

→ Relativité restreinte

● Postulat 1

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

● Postulat 2

La vitesse de propagation de la lumière dans le vide est indépendante du mouvement de la source lumineuse : elle est **invariante** quelque soit le référentiel galiléen.



● Conséquence

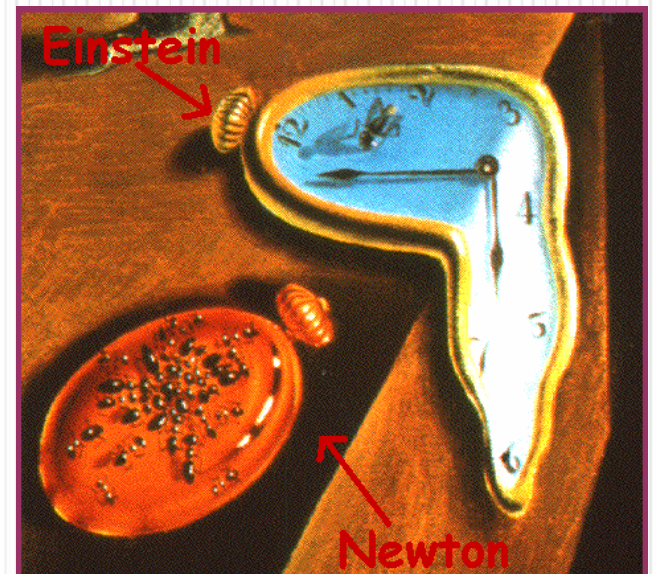
Il existe une vitesse limite, égale à la célérité c de la lumière dans le vide, qui ne peut être dépassée par aucun signal transportant une information, ni aucune particule.

THEME 2 : Lois et modèles

C12 Relativité du temps

II. Les effets de la relativité restreinte

1. A chacun son temps
=> Activité 2 P.245



2

À chacun son temps

► L'invariance de la vitesse de propagation de la lumière dans le vide impose de reconsidérer nos notions intuitives sur le temps. Un phénomène a-t-il la même durée si on l'étudie dans deux référentiels différents ?

Imaginons l'expérience de pensée suivante : dans le wagon d'un train, on a placé une enceinte où on a fait le vide. Cette enceinte contient une source d'éclairs lumineux placée au sol et un miroir placé à la verticale de cette source, à une distance h .

Ce wagon passe devant la gare avec une vitesse v constante.

Dans le wagon, un dispositif avec une horloge très précise permet de mesurer la durée Δt_{wagon} de propagation d'un éclair depuis son émission jusqu'à son retour au point de départ (figure 3 a).

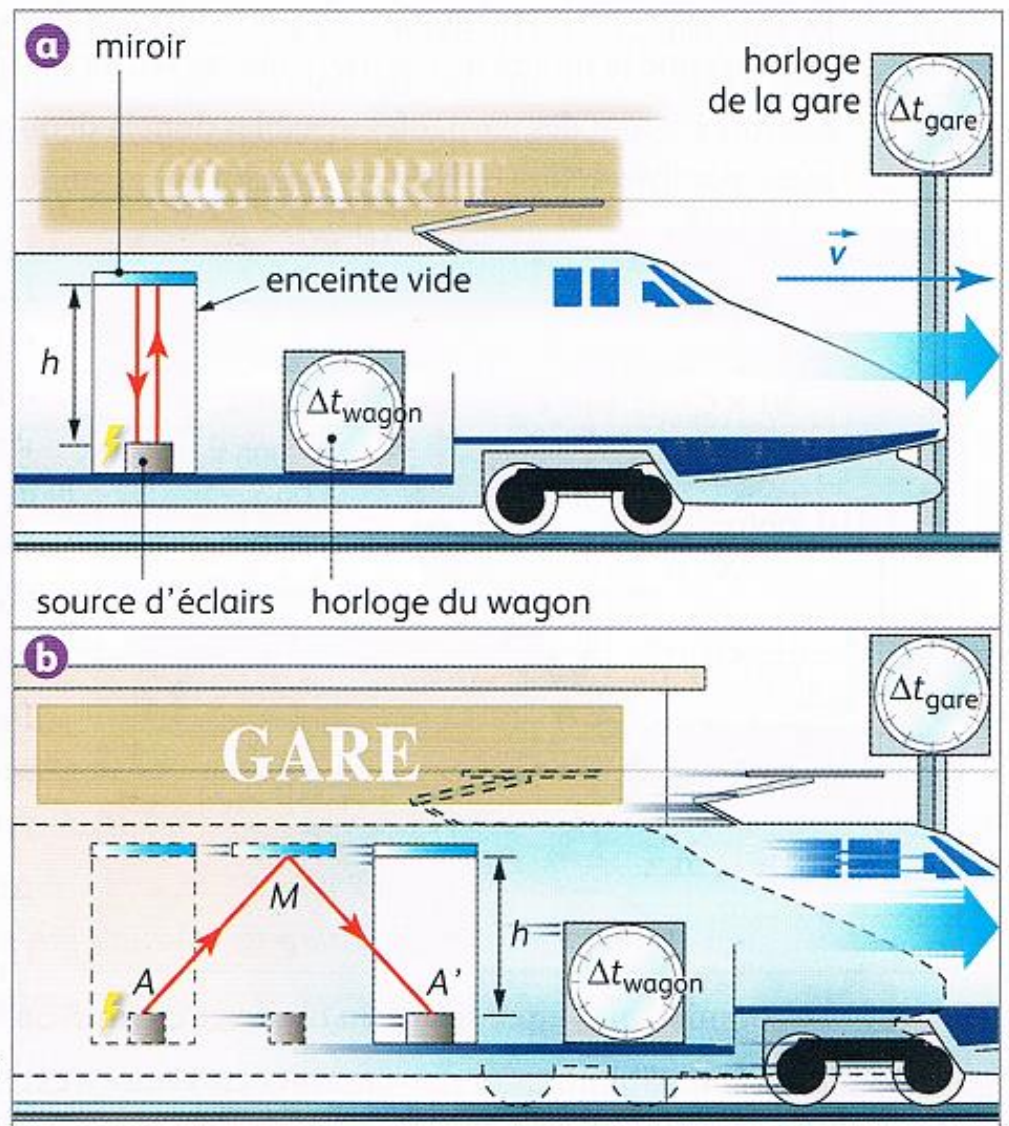
Sur le quai de la gare, un autre dispositif avec une horloge tout aussi précise permet de mesurer la durée Δt_{gare} du trajet aller-retour du même éclair (figure 3 b).

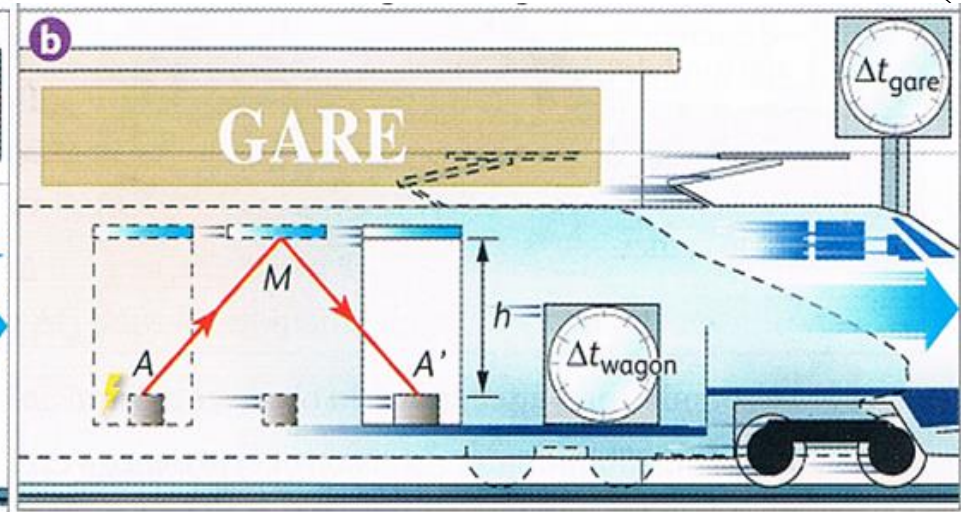
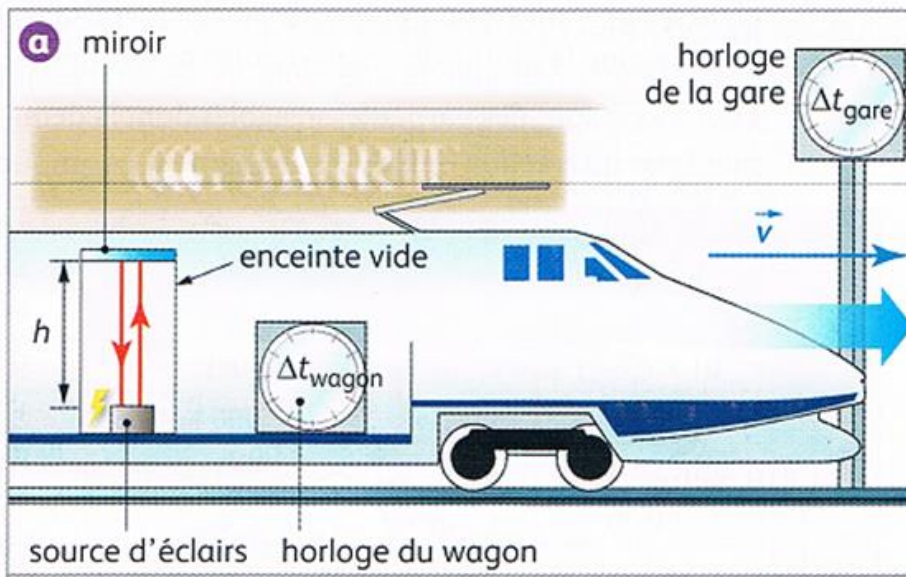
2 Expérience de pensée : l'horloge de lumière.

3 ▶ Trajectoire d'un éclair dans :

a dans le référentiel du wagon ;

b dans le référentiel de la gare.

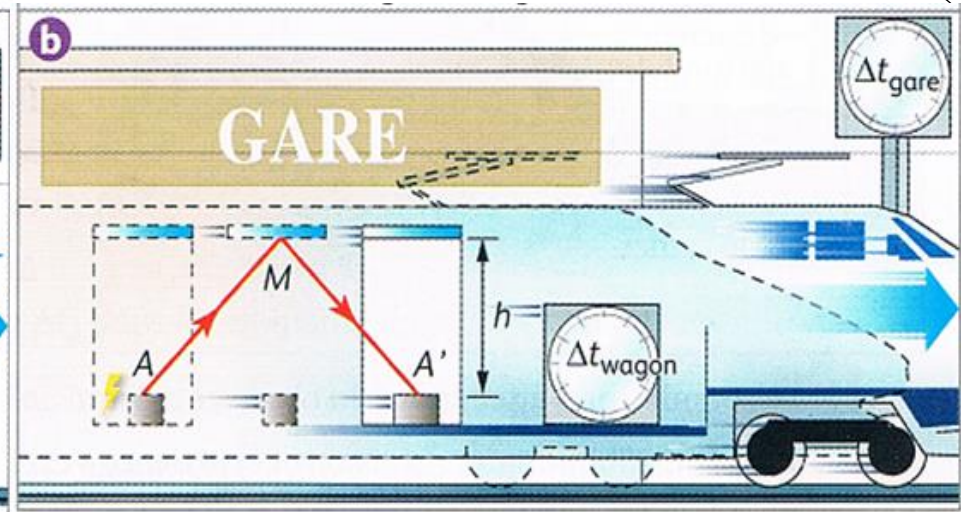
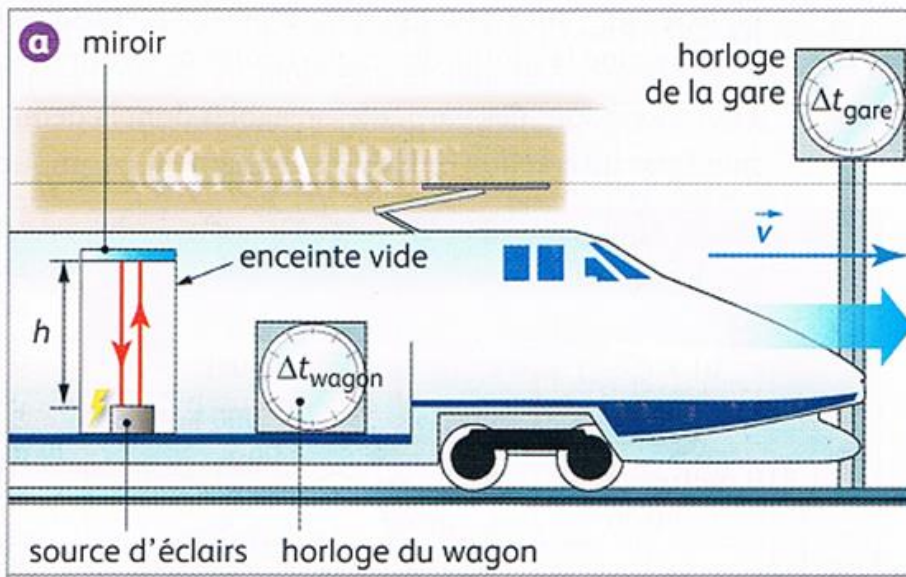




1 Analyser les documents

a. Expliquer la différence de trajectoire des éclairs des figures 3 a et 3 b.

Dans le référentiel du train (fig. 3a), la distance parcourue par les éclairs vaut $2h$
 Dans le référentiel de la gare (fig. 3b), elle vaut $AM + MA' > 2h$ car le miroir se déplace à la vitesse v par rapport à la gare.



b. On admet que la vitesse de propagation de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels galiléens.

Montrer que la durée Δt_{gare} de l'aller-retour d'un éclair, mesurée par l'horloge de la gare, est supérieure à la durée Δt_{wagon} du même aller-retour, enregistrée par l'horloge du wagon.

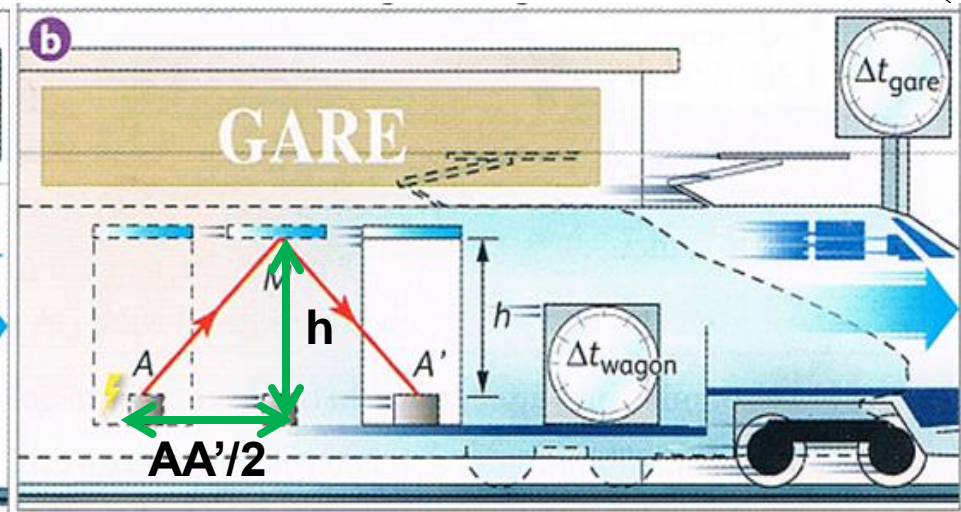
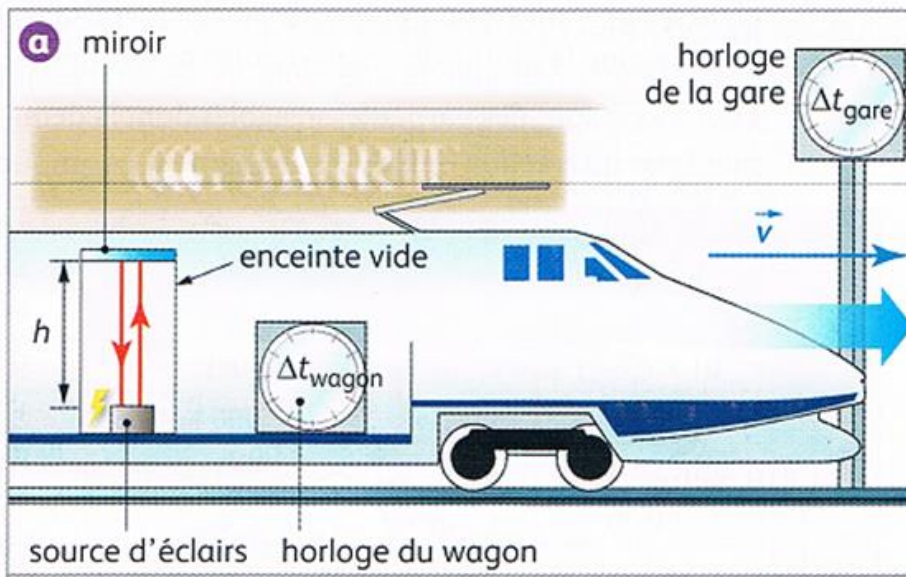
Dans le référentiel du train ou celui de la gare, la vitesse de la lumière est la même, égale à c

$$\Delta t_{\text{wagon}} = \frac{2h}{c} \quad \Delta t_{\text{gare}} = \frac{AM + MA'}{c} > \Delta t_{\text{wagon}}$$

2 Exploiter les documents

a. On raisonne en se plaçant dans le référentiel du wagon.
Exprimer h en fonction de Δt_{wagon} et c .

$$h = \frac{1}{2} c \Delta t_{\text{wagon}}$$



$$\Delta t_{\text{gare}} = \frac{AM + MA'}{c}$$

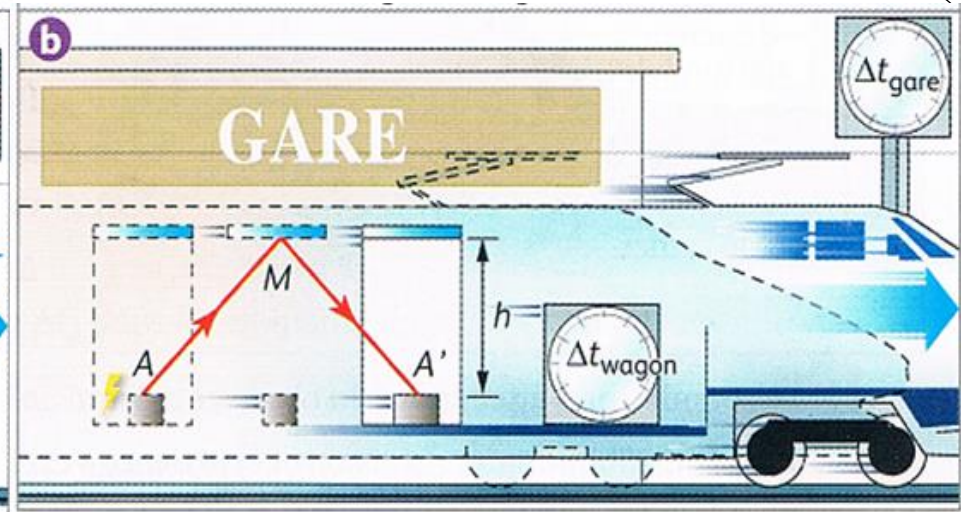
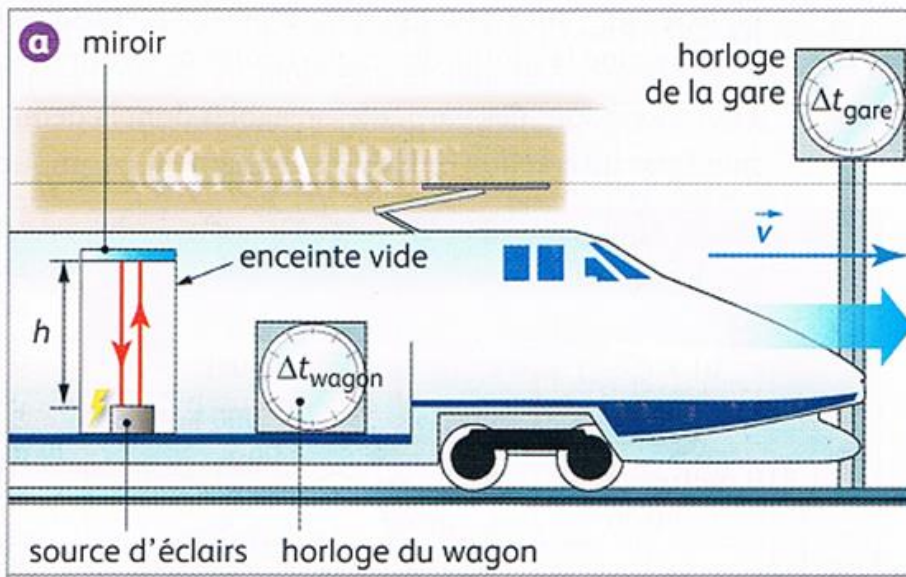
b. On raisonne maintenant en se plaçant dans le référentiel de la gare :

- exprimer la distance AA' en fonction de Δt_{gare} et de v , puis les distances AM et $A'M$ en fonction de Δt_{gare} et c ;
- exprimer les distances AM et $A'M$ en fonction de h et de AA' .

$$AA' = v \times \Delta t_{\text{gare}}$$

$$AM = A'M = c \times \frac{\Delta t_{\text{gare}}}{2}$$

En appliquant le théorème de Pythagore : $AM = A'M = \sqrt{h^2 + \left(\frac{AA'}{2}\right)^2}$



$$AA' = v \times \Delta t_{\text{gare}}$$

$$AM = A'M = c \times \frac{\Delta t_{\text{gare}}}{2}$$

$$h = \frac{1}{2} c \Delta t_{\text{wagon}}$$

$$AM = A'M = \sqrt{h^2 + \left(\frac{AA'}{2}\right)^2}$$

c. En déduire que les durées mesurées dans le référentiel du wagon et dans le référentiel de la gare sont liées par la relation :

$$\Delta t_{\text{gare}} = \frac{\Delta t_{\text{wagon}}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

En remplaçant AM , h et AA' par leurs expressions trouvées en a. et b. :

$$c \times \frac{\Delta t_{\text{gare}}}{2} = \sqrt{\left(c \times \frac{\Delta t_{\text{wagon}}}{2}\right)^2 + \left(v \times \frac{\Delta t_{\text{gare}}}{2}\right)^2}$$

$$c^2 \Delta t_{\text{gare}}^2 = (c \Delta t_{\text{wagon}})^2 + (v \Delta t_{\text{gare}})^2$$

$$\Delta t_{\text{gare}}^2 (c^2 - v^2) = \Delta t_{\text{wagon}}^2 c^2$$

3 Conclure

Selon la **théorie de la relativité du temps**, on dit qu'il y a « dilatation des durées » pour un objet en mouvement du point de vue d'un observateur immobile.

Expliquer comment cette expression s'applique à l'exemple précédent et en déduire que le temps a un caractère **relatif**.

$$\Delta t_{\text{gare}} = \frac{\Delta t_{\text{wagon}}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t_{\text{gare}} > \Delta t_{\text{wagon}}$$

Pour le phénomène étudié : l'aller-retour de l'éclair, un observateur sur le quai de la gare mesure une durée plus grande qu'un observateur dans le wagon =>

Il constate une **dilatation de la durée du phénomène**.

La durée d'un phénomène dépend du référentiel dans lequel s'effectue cette mesure. Le

temps n'est pas absolu : il a un caractère relatif vis-à-vis du référentiel de mesure.



8 En relativité restreinte, la simultanéité d'un événement est relative au référentiel dans lequel la mesure est effectuée.

THEME 2 : Lois et modèles

C12 Relativité du temps

II. Les effets de la relativité restreinte

1. A chacun son temps

2. Durée propre et durée mesurée

Le référentiel propre R_p d'un objet est le référentiel dans lequel cet objet est immobile

Ne rien noter

= le train (activité 2) dans lequel la source de lumière est immobile.

= la voiture (retour vers le futur) dans laquelle le chien est immobile.

C'est aussi le référentiel dans lequel a lieu l'événement étudié

= l'aller-retour de l'éclair dans le train (activité 2)

La durée propre Δt_p ou temps propre d'un évènement est la durée mesurée par une horloge immobile dans le référentiel propre

= la durée d'un aller-retour de l'éclair dans le train (activité 2).

La durée mesurée Δt_m ou durée impropre d'un évènement est la durée mesurée par une horloge dans un référentiel R en mouvement par rapport au référentiel propre

= la durée d'un aller-retour de l'éclair mesurée depuis le quai de la gare

La durée mesurée Δt_m de l'évènement est toujours supérieure à La durée propre Δt_p
On dit qu'il y a dilatation du temps

= la durée de l'aller-retour Δt_m de l'éclair mesurée depuis le quai de la gare est plus grande que celle mesurée Δt_p dans le train

=> - événement étudié : la sieste

- référentiel propre : le vaisseau ;

- durée propre : $\Delta t_p = 5 \text{ min}$

- Terre : référentiel en mouvement par rapport au référentiel propre ;

- durée mesurée : $\Delta t_m > 5 \text{ min}$



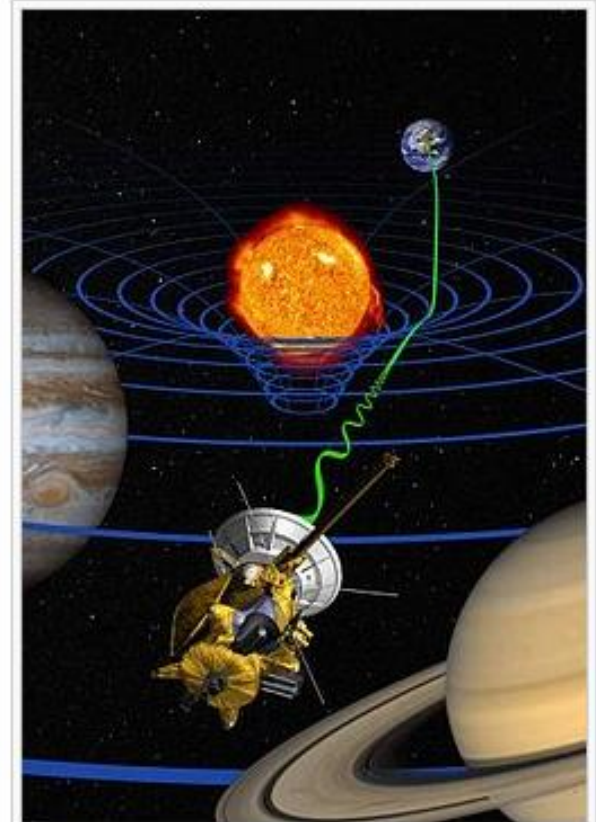
$$\Delta t_m = \gamma \Delta t_p$$


avec γ : Coefficient de dilatation des durées $\Rightarrow \gamma > 1$

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

avec v : vitesse du référentiel R par rapport au référentiel propre R_p
 c : vitesse de la lumière dans le vide

NB : la théorie de la relativité restreinte ne prend pas en compte les cas où le champ gravitationnel intervient : la théorie de la relativité générale en tient compte (Einstein – 1916)



Test de haute précision de la relativité générale 
par la sonde spatiale Cassini (vue d'artiste): des signaux radio envoyés entre la Terre et la sonde (onde verte) sont retardés par la déformation de l'espace et du temps due à la masse du Soleil.

THEME 2 : Lois et modèles

C12 Relativité du temps

- II. Les effets de la relativité restreinte**
 - 1. A chacun son temps**
 - 2. Durée propre et durée mesurée**
 - 3. La relativité du temps à l'épreuve de l'expérience**
 - => Activité 3 P.246**

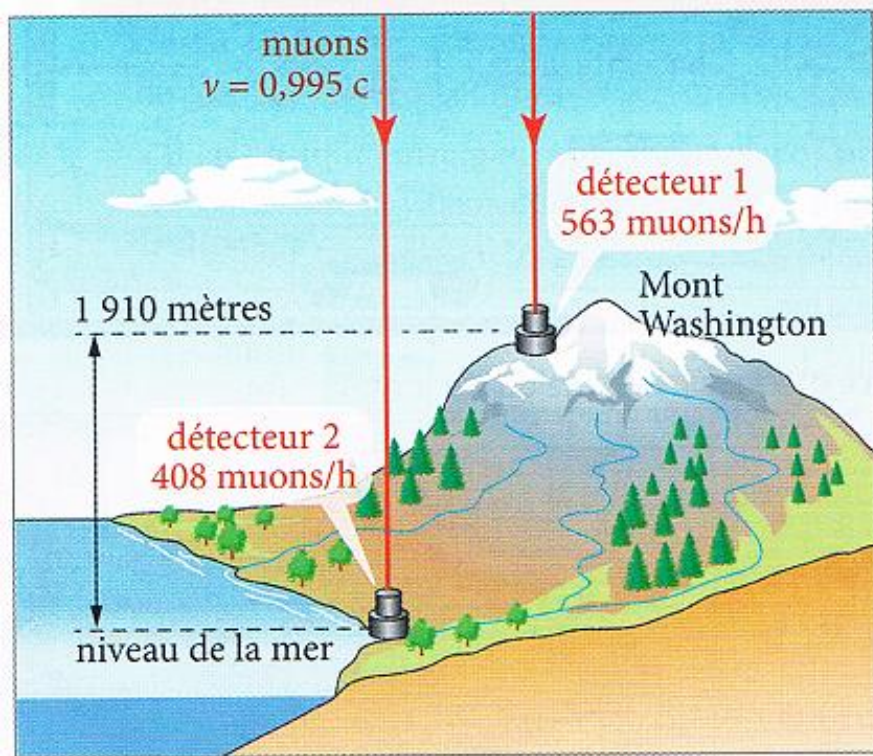
3

Relativité du temps à l'épreuve de l'expérience

► La théorie de la relativité du temps a été confirmée par de nombreuses expériences. Examinons la première confirmation expérimentale.

Si on observe un grand nombre de particules instables et identiques dans un référentiel où elles sont immobiles, en moyenne la moitié de ces particules se seront désintégrées après une durée $t_{1/2}$, appelée demi-vie.

Les muons sont des particules instables dont la demi-vie est $t_{1/2} = 1,53 \mu\text{s}$. Ces muons sont produits abondamment par interaction entre le rayonnement cosmique et l'atmosphère.



5 Expérience

Dans l'expérience de Rossi et Hall en 1941, un détecteur est réglé pour détecter les muons se déplaçant au voisinage d'une verticale par rapport à la Terre et de vitesse moyenne $v = 0,995 c$. Ce détecteur est situé à 1910 mètres d'altitude au sommet du Mont Washington (États-Unis) et enregistre 563 ± 10 muons par heure.

Un deuxième détecteur, identique, est situé au niveau de la mer et enregistre 408 ± 9 muons par heure.

Prévision

15 Mesurée dans le référentiel terrestre, la durée nécessaire pour qu'un muon parcoure une distance de 1910 mètres est $\Delta t = \frac{1910}{0,995 c} = 6,40 \mu\text{s}$, soit près de quatre fois sa demi-vie ($t_{1/2} = 1,53 \mu\text{s}$). S'il y avait en moyenne 563 muons par heure

au sommet, on s'attendrait à en observer environ $563/2^4$ au niveau de la mer, soit une trentaine seulement.

20 L'incompatibilité entre prévision et expérience s'explique par la dilatation du temps, car dans le référentiel où un muon est immobile il s'est écoulé seulement $0,64 \mu\text{s}$ pour ce parcours. L'évolution en fonction du temps du nombre de particules restantes obéit à une loi dite de décroissance. En appliquant cette loi pour la durée de parcours de $0,64 \mu\text{s}$, on trouve 421 ± 8 muons par heure détectés au niveau de la mer.

1 Analyser les documents

a. Que signifient les indications ± 10 et ± 9 associées au nombre de muons détectés ?

Les résultats expérimentaux sont donnés ici avec leur incertitude.
A 1910 m, on détecte entre 553 et 573 muons par heure.

b. Expliquer l'expression « dilatation du temps » utilisée à la ligne 20.

Evènement étudié : le parcours des 1910m par des muons

Référentiel propre : le muon

Durée propre : $\Delta t_p = 0,64 \mu s$

Référentiel en mouvement par

rapport au référentiel propre (muon) : le référentiel terrestre

Durée mesurée : $\Delta t_m = 6,40 \mu s$

=> La durée mesurée sur Terre est 10 fois plus grande que la durée propre dans le référentiel du muon : le temps s'est dilaté.

20 L'incompatibilité entre prévision et expérience s'explique par la dilatation du temps, car dans le référentiel où un muon est immobile il s'est écoulé seulement $0,64 \mu s$ pour ce parcours. L'évolution en fonction du temps

15 Mesurée dans le référentiel terrestre, la durée nécessaire pour qu'un muon parcoure une distance de 1910 mètres est

$$\Delta t = \frac{1910}{0,995c} = 6,40 \mu s, \text{ soit près de quatre fois sa demi-vie}$$



Pour la question 1.a., voir le dossier « Mesures et incertitude ».

2 Interpréter les documents

a. En exploitant la définition donnée dans les trois premières lignes du texte, justifier la valeur numérique annoncée ligne 19 et la comparer avec la valeur mesurée.

Si on observe un grand nombre de particules instables et identiques dans un référentiel où elles sont immobiles, en moyenne la moitié de ces particules se seront désintégrées après une durée $t_{1/2}$, appelée demi-vie.

Les muons sont des particules instables dont la demi-vie est $t_{1/2} = 1,53 \mu\text{s}$. Ces muons sont produits abondamment par interaction entre le rayonnement cosmique et l'atmosphère.

($t_{1/2} = 1,53 \mu\text{s}$). S'il y avait en moyenne 563 muons par heure au sommet, on s'attendrait à en observer environ $563/2^4$ au niveau de la mer, soit une trentaine seulement.

Demi-vie $t_{1/2}$: durée au bout de laquelle la moitié des muons s'est désintégrée : $t_{1/2} = 1,53 \mu\text{s}$.
Pendant la durée du parcours des 1910m dans le référentiel terrestre, $\Delta t_m = 6,40 \mu\text{s}$, le nombre de demi-vies écoulées vaut
 $\Delta t_m / t_{1/2} = 4,2 \approx 4$

2 Interpréter les documents

a. En exploitant la définition donnée dans les trois premières lignes du texte numérique annoncée ligne 19 et la comparer avec la valeur mesurée.

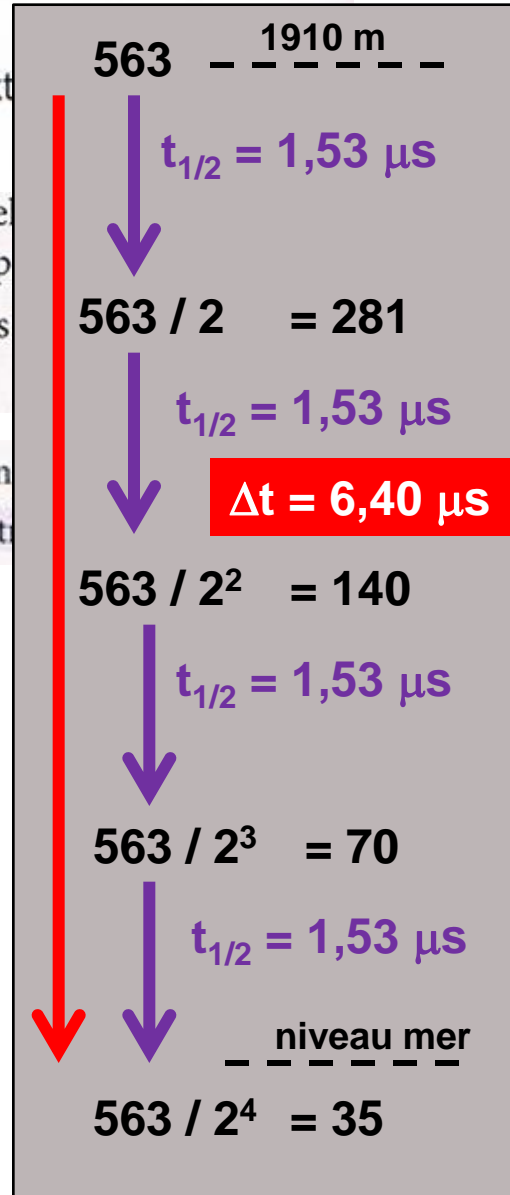
Si on observe un grand nombre de particules instables et identiques dans un référentiel, en moyenne la moitié de ces particules se seront désintégrées après une durée $t_{1/2}$, appelée demi-vie. Les muons sont des particules instables dont la demi-vie est $t_{1/2} = 1,53 \mu\text{s}$. Ces muons sont créés en permanence par interaction entre le rayonnement cosmique et l'atmosphère.

($t_{1/2} = 1,53 \mu\text{s}$). S'il y avait en moyenne 563 muons au sommet, on s'attendrait à en observer environ $563/2^4$ au niveau de la mer, soit une t

Demi-vie $t_{1/2}$: durée au bout de laquelle la moitié des muons s'est désintégrée : $t_{1/2} = 1,53 \mu\text{s}$. Pendant la durée du parcours des 1910m dans le référentiel terrestre, $\Delta t_m = 6,40 \mu\text{s}$, le nombre de demi-vies écoulées vaut $\Delta t_m / t_{1/2} = 4,2 \approx 4$

Plus précisément : $N = N_0 / 2^{4,2} = 563/2^{4,2} \approx 30$

Or on en détecte 408 soit 14 fois plus !
=> Le calcul doit donc tenir compte du phénomène de dilatation du temps.



b. La durée Δt_p du parcours mesurée dans le référentiel où la particule est immobile s'appelle la **durée propre**. Elle est liée à la **durée mesurée** Δt_m du même parcours, mesurée dans un référentiel autre que celui de la particule, par la relation :

$$\Delta t_m = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta t_p$$

où v est la vitesse de la particule dans ce référentiel et c est la célérité de la lumière dans le vide. Justifier la valeur annoncée pour la durée propre de parcours des muons.

$$\Delta t_p = \Delta t_m \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 6,40 \times \sqrt{1 - \frac{0,995^2 c^2}{c^2}} = 0,64 \mu\text{s}$$

c. Le nombre de particules mesuré au niveau de la mer est-il compatible avec les prévisions théoriques ?

Dans le référentiel propre (du muon) $\Delta t_p = 0,64 \mu\text{s}$ donc $\Delta t_p / t_{1/2} = 0,42$

En appliquant la loi de décroissance radioactive, au bout de $0,64 \mu\text{s}$, il reste $N = N_0 / 2^{0,42} = 563 / 2^{0,42} \approx 421$

20 L'incompatibilité entre prévision et expérience s'explique par la dilatation du temps, car dans le référentiel où un muon est immobile il s'est écoulé seulement $0,64 \mu\text{s}$ pour ce parcours. L'évolution en fonction du temps du nombre de particules restantes obéit à une loi dite de décroissance. En appliquant cette loi pour la durée de parcours de $0,64 \mu\text{s}$, on trouve 421 ± 8 muons par heure détectés au niveau de la mer.

$N_{\text{théorique}} \approx 413 \text{ à } 429$

$N_{\text{mesuré}} \approx 399 \text{ à } 417$

Un deuxième détecteur, identique, est situé au niveau de la mer et enregistre 408 ± 9 muons par heure.

Les deux domaines d'incertitude ont une intersection commune => les résultats théorique et expérimental sont en accord.

3 Conclure

Rédiger une synthèse pour expliquer en quoi cette expérience valide la théorie de la relativité du temps.

Si on considère le temps absolu (le même en tout lieu), la plupart des muons devraient être désintégrés avant d'arriver au niveau de la mer, ce qui n'est pas observé !

La relativité du temps donne une explication cohérente : la durée du déplacement d'un muon dans le référentiel de la particule est plus petite que la durée mesurée dans le référentiel terrestre ; puisque cette durée est assez courte, une faible partie des particules se désintègrent pendant le parcours.



CERN à Genève:

Muons au repos:

duree de vie = $2,2 \mu s$

Muons accélérés à $v = 0,9994 c$

duree de vie = $63,6 \mu s$

THEME 2 : Lois et modèles

C12 Relativité du temps

III. Importance des effets relativistes => Activité 4 P.247

Compétences générales mises en œuvre

ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE

• Extraire et exploiter des informations • Effectuer et justifier un calcul

4

Importance des effets relativistes

► Dans certaines situations techniques ou scientifiques, il faut déterminer si la relativité du temps doit être prise en compte ou non. Examinons quelques situations.

Dans la mécanique d'Einstein, la durée concernant un objet (par exemple : durée du déplacement de l'objet) est appelée durée propre si elle est mesurée dans un référentiel lié à cet objet, et durée mesurée si elle est mesurée dans un autre référentiel. Voici ci-dessous quelques exemples d'objets en mouvement dans le référentiel terrestre. Δt_p est la durée propre, lorsque la durée mesurée Δt_m dans le référentiel terrestre vaut exactement 1 seconde.

	Vitesse dans le référentiel terrestre ($m \cdot s^{-1}$)	Δt_m (s)	Δt_p (s)
Marcheur	1	1	$1 - 5,6 \times 10^{-18}$
TGV	80	1	$1 - 3,6 \times 10^{-14}$
Avion de ligne	250	1	$1 - 3,5 \times 10^{-13}$
Satellite du système GPS	4 000	1	$1 - 8,9 \times 10^{-11}$
Sonde solaire Helios 2	7×10^4	1	$1 - 2,7 \times 10^{-8}$
Particule α	10^7	1	0,999 44
Électron dans un microscope électronique	$0,5 c$	1	0,87
Proton dans l'accélérateur LHC	$0,999\ 999\ 991 c$	1	$1,3 \times 10^{-4}$

Vocabulaire

Helios 2 est une sonde solaire (c'est actuellement l'appareil le plus rapide construit par l'homme).

LHC (Large Hadron Collider) : accélérateur de particules situé à la frontière franco-suisse.

5 Vitesses et durées propres de quelques objets en mouvement.

1 Analyser le document

Justifier l'écriture de la valeur de Δt_p dans les cinq premières lignes du tableau.

On est obligé d'utiliser l'écriture scientifique (puissance de 10) car l'écart entre Δt_m et Δt_p est très très faible. Avec l'écriture décimale, il faudrait écrire ces valeurs avec un nombre de chiffres significatifs énorme !

Exemple : $1 - 5,6 \cdot 10^{-18} = 0,999\ 999\ 999\ 999\ 999\ 9944$!!

2 Interpréter les informations

a. Quelle erreur relative $\frac{\Delta t_m - \Delta t_p}{\Delta t_m}$ exprimée en pourcentage, commet-on dans chacun des cas présentés si l'on ne tient pas compte de la dilatation des durées ?

	Vitesse dans le référentiel terrestre ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Δt_m (s)	Δt_p (s)	$\frac{\Delta t_m - \Delta t_p}{\Delta t_m}$ en %
Marcheur	1	1	$1 - 5,6 \times 10^{-18}$	$5,6 \times 10^{-16}$
TGV	80	1	$1 - 3,6 \times 10^{-14}$	$3,6 \times 10^{-12}$
Avion de ligne	250	1	$1 - 3,5 \times 10^{-13}$	$3,5 \times 10^{-11}$
Satellite du système GPS	4 000	1	$1 - 8,9 \times 10^{-11}$	$8,9 \times 10^{-9}$
Sonde solaire Helios 2	7×10^4	1	$1 - 2,7 \times 10^{-8}$	$2,7 \times 10^{-6}$
Particule α	10^7	1	0,999 44	0,056
Électron dans un microscope électronique	$0,5 c$	1	0,87	13
Proton dans l'accélérateur LHC	$0,999\,999\,991 c$	1	$1,3 \times 10^{-4}$	100

b. Comparer l'erreur relative calculée à la question **2 a.** avec la précision d'une horloge à quartz dérivant au maximum d'une seconde par an, soit de $3 \times 10^{-6} \%$.

À cette précision, pour quels objets étudiés doit-on tenir compte de la relativité du temps ?

Répondre aux mêmes questions pour une horloge atomique dérivant d'une seconde en un million d'années, soit de $3 \times 10^{-12} \%$.

	Vitesse dans le référentiel terrestre ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Δt_m (s)	Δt_p (s)	$\frac{\omega_m - \omega_p}{\Delta t_m}$ en %
Marcheur	1	1	$1 - 5,6 \times 10^{-18}$	$5,6 \times 10^{-16}$
TGV	80	1	$1 - 3,6 \times 10^{-14}$	$3,6 \times 10^{-12}$
Avion de ligne	250	1	$1 - 3,5 \times 10^{-13}$	$3,5 \times 10^{-11}$
Satellite du système GPS	4 000	1	$1 - 8,9 \times 10^{-11}$	$8,9 \times 10^{-9}$
Sonde solaire Helios 2	7×10^4	1	$1 - 2,7 \times 10^{-8}$	$2,7 \times 10^{-6}$
Particule α	10^7	1	0,999 44	0,056
Électron dans un microscope électronique	$0,5 c$	1	0,87	13
Proton dans l'accélérateur LHC	$0,999\ 999\ 991 c$	1	$1,3 \times 10^{-4}$	100

Pour les engins construits par l'homme jusqu'au plus rapide (Hélios 2), la précision de la montre à quartz est insuffisante pour mesurer l'écart relativiste. Pour les 3 derniers cas, l'écart est important =>

ce serait inacceptable pour un scientifique de ne pas tenir compte de la relativité du temps.

Avec l'horloge atomique, à l'exception

du marcheur, on peut mesurer l'effet relativiste donc tenir compte de la relativité du temps dans les expériences menées.

Les horloges atomiques actuelles permettent la mesure d'effets relativistes pour des vitesses très faibles devant c , de l'ordre de $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

A cette précision, pour quels objets étudiés doit-on tenir compte de la relativité du temps ?

Répondre aux mêmes questions pour une horloge atomique dérivant d'une seconde en un million d'années, soit de $3 \times 10^{-12} \%$.

	Vitesse dans le référentiel terrestre ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Δt_m (s)	Δt_p (s)	$\frac{\omega_m - \omega_p}{\Delta t_m}$ en %
Marcheur	1	1	$1 - 5,6 \times 10^{-18}$	$5,6 \times 10^{-16}$
TGV	80	1	$1 - 3,6 \times 10^{-14}$	$3,6 \times 10^{-12}$
Avion de ligne	250	1	$1 - 3,5 \times 10^{-13}$	$3,5 \times 10^{-11}$
Satellite du système GPS	4 000	1	$1 - 8,9 \times 10^{-11}$	$8,9 \times 10^{-9}$
Sonde solaire Helios 2	7×10^4	1	$1 - 2,7 \times 10^{-8}$	$2,7 \times 10^{-6}$
Particule α	10^7	1	0,999 44	0,056
Électron dans un microscope électronique	$0,5 c$	1	0,87	13
Proton dans l'accélérateur LHC	$0,999\ 999\ 991 c$	1	$1,3 \times 10^{-4}$	100

Pour les engins construits par l'homme jusqu'au plus rapide (Hélios 2), la précision de la montre à quartz est insuffisante pour mesurer l'écart relativiste. Pour les 3 derniers cas, l'écart est important =>

ce serait inacceptable pour un scientifique de ne pas tenir compte de la relativité du temps.

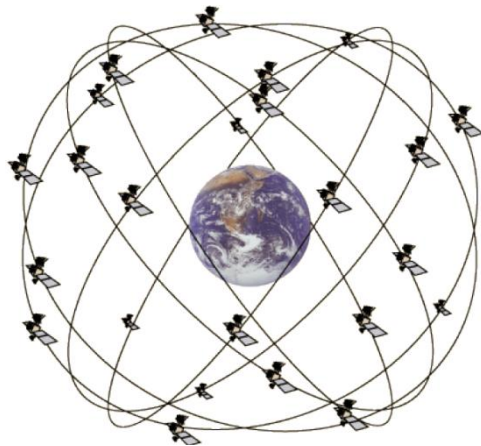
Avec l'horloge atomique, à l'exception du marcheur, on peut mesurer l'effet relativiste donc tenir compte de la relativité du temps dans les expériences menées.

c. Dans les systèmes de positionnement GPS et Galileo (**document 6**), on mesure des durées τ de parcours de signaux électromagnétiques pour calculer des distances : $d = c\tau$.

On suppose que, parmi tous les paramètres intervenant dans le fonctionnement de ces systèmes, seule la dilatation du temps n'ait pas été prise en compte.

– Quel serait, au bout d'une heure de fonctionnement, l'écart entre l'indication d'une horloge atomique terrestre et celle d'une horloge atomique embarquée dans le satellite du système GPS mentionné dans le tableau ?

– Quelle erreur sur la distance satellite-véhicule mesurée par le système GPS correspond à cet écart ? Est-elle acceptable par les utilisateurs ?



Global Positioning System (GPS)



6 ► Vue d'artiste d'un satellite du système de positionnement européen Galileo.

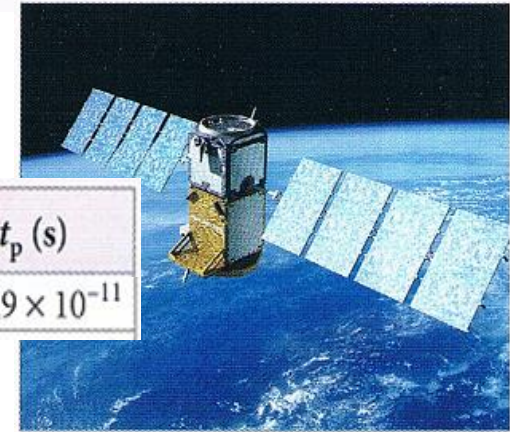
c. Dans les systèmes de positionnement GPS et Galileo (**document 6**), on mesure des durées τ de parcours de signaux électromagnétiques pour calculer des distances : $d = c\tau$.

On suppose que, parmi tous les paramètres intervenant dans le fonctionnement de ces systèmes, seule la dilatation du temps n'ait pas été prise en compte.

– Quel serait, au bout d'une heure de fonctionnement, l'écart entre l'indication d'une horloge atomique terrestre et celle d'une horloge atomique embarquée dans le satellite du système GPS mentionné dans le tableau ?

– Quelle erreur sur la distance satellite-véhicule mesurée par le système GPS correspond à cet écart ? Est-elle acceptable par les utilisateurs ?

	Vitesse dans le référentiel terrestre ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Δt_m (s)	Δt_p (s)
Satellite du système GPS	4 000	1	$1 - 8,9 \times 10^{-11}$



6 ► Vue d'artiste d'un satellite du système de positionnement européen Galileo.

Pour chaque seconde écoulée sur l'horloge terrestre on accumule une différence de $8,9 \times 10^{-11}$ s, ce qui, au bout d'une heure de fonctionnement aboutit à un écart de

$$\tau = 8,9 \times 10^{-11} \times 3600 = 3,2 \times 10^{-7} \text{ s.}$$

Cet écart correspond à une distance de

$$d = c\tau = 3,2 \times 10^{-7} \times 3 \times 10^8 = 96 \text{ m} \Rightarrow$$

ce n'est pas acceptable par un utilisateur donc le GPS doit tenir compte de l'effet relativiste.

3 Conclure

En tenant compte des réponses aux questions 2 a. et 2 b., trouver deux critères à prendre en considération pour décider si la théorie de la relativité, et donc la dilatation des durées, doivent être prises en compte pour mesurer des durées.

- La vitesse car l'effet relativiste augmente avec la vitesse.
- La précision de l'appareil de mesure (horloge) : comme dans toute mesure physique, la précision du calcul dépend de celle de l'appareil de mesure.



Confirmations expérimentales

- La théorie de la relativité restreinte est confirmée dans toutes ses conséquences expérimentales :
 - aux vitesses non négligeables devant c , on observe des particules instables pendant des durées très supérieures à leur durée de vie propre ;
 - pour les vitesses très petites devant c , la précision des horloges atomiques est nécessaire pour mesurer la dilatation du temps.

Exemple

La mesure du temps dans un système de localisation (GPS ou Galileo) est d'une précision telle que la relativité du temps doit être prise en compte.

