

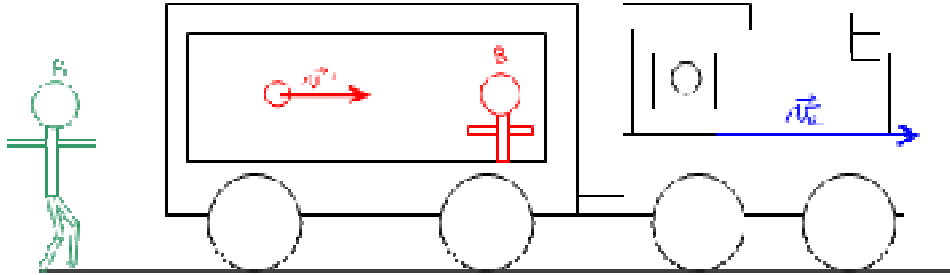
RELATIVITE RESTREINTE

La relativité est née de paradoxe intrinsèque à la théorie classique et d'expérience qui n'étaient pas interprétable par les lois connues

I. Invariance de la vitesse de la lumière

1. Composition des vitesses

Loi de composition des vitesses :

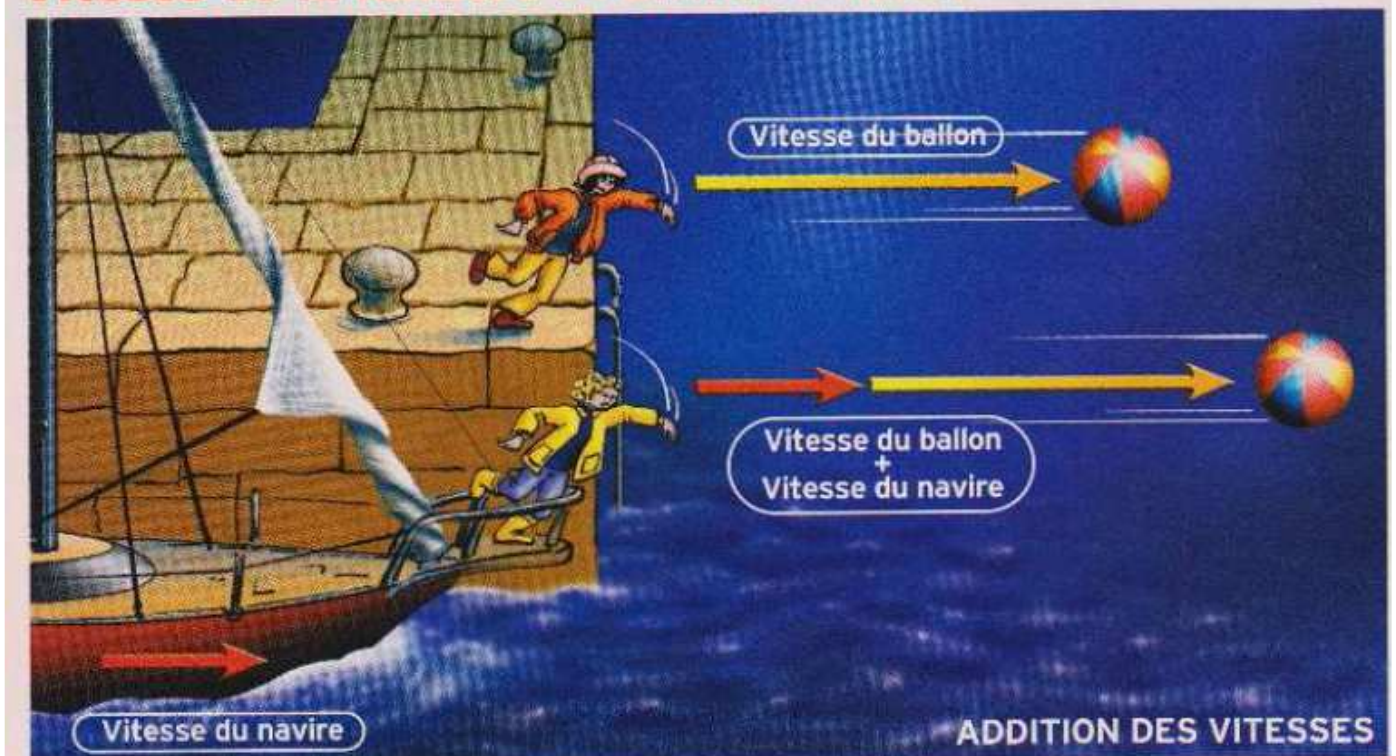


Sachant que le train se déplace à la vitesse \vec{v} dans le référentiel R terrestre, si \vec{v}' est la vitesse de la balle dans le référentiel R' du train, pour l'observateur A, la balle se déplace à la vitesse $\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}$ dans le référentiel R (terrestre).

Cette loi de composition des vitesses de Galilée a été utilisée jusqu'au début du XX^{ème} siècle.

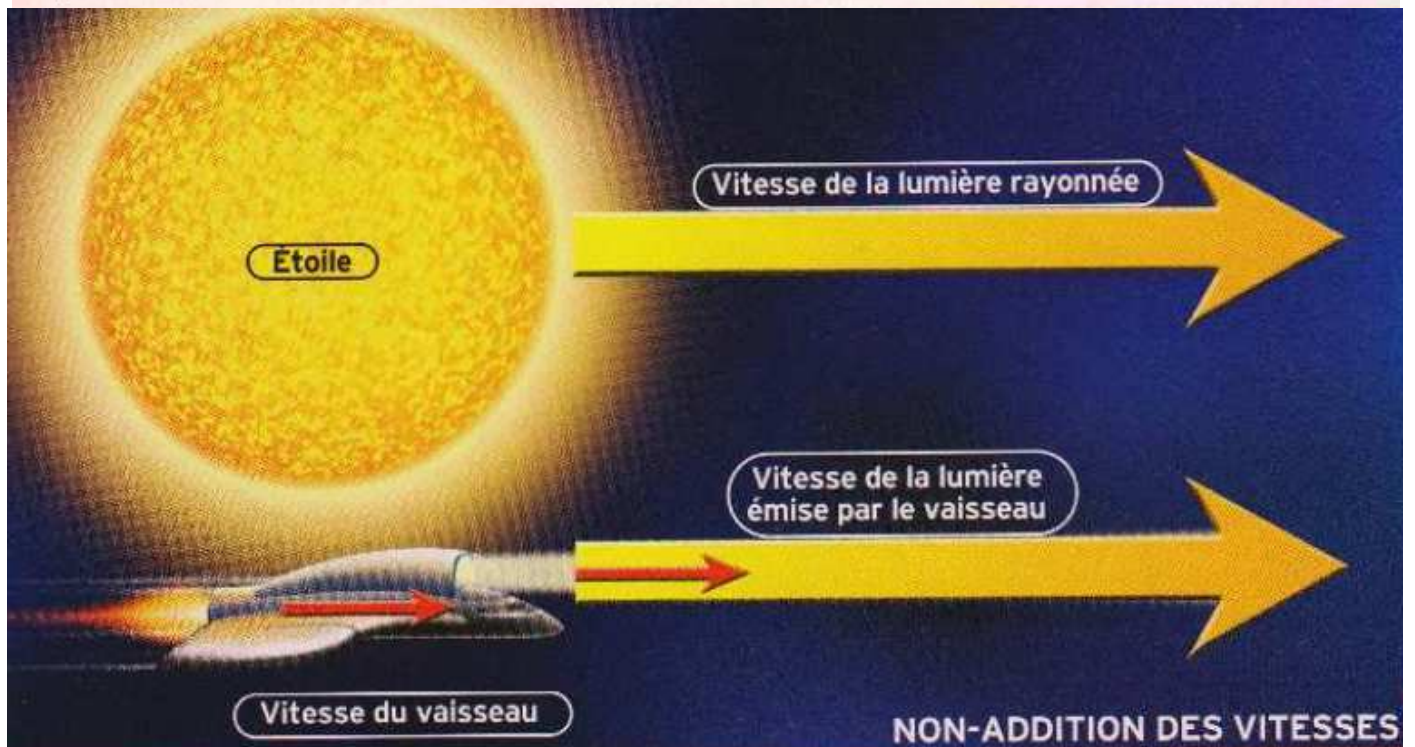
Nous allons voir que cette loi de composition des vitesses n'est pas suivie par la lumière, qui conserve la même célérité dans le vide quel que soit le référentiel galiléen. Elle n'est valable que pour de faible vitesse $v \ll c$.

Vitesse de la lumière : l'ultime limite !



Avant d'illustrer la théorie de la relativité restreinte inventée par Einstein, il faut revenir en 1638 quand le physicien et astronome italien Galilée inventa, lui, le principe de relativité. Imaginons que vous soyez dans un port et que vous observiez la scène suivante : sur le quai d'en face, un touriste envoie un ballon vers le large à, disons, 10 m/s (flèche jaune). Au même moment, un marin s'adonne exactement au même exercice, à la différence près qu'il se trouve sur la proue d'un navire qui longe le quai à une vitesse de 3 m/s (flèche rouge). Que voyez-vous au bout d'une seconde ? Alors que le ballon du touriste a logiquement parcouru 10 m, celui du marin en a parcouru 13. La vitesse initiale du ballon – c'est-à-dire celle du navire – s'est en effet ajoutée à la vitesse imprimée par le marin, ce qui lui confère bien une vitesse totale de 13 m/s. Conclusion de Galilée : les vitesses sont relatives car elles dépendent du point de vue de l'observateur.

Mais si tout cela marche très bien avec les phénomènes de la vie courante, ça ne fonctionne plus du tout avec la lumière. Logique, nous dit Einstein, puisque sa vitesse de 300 000 km/s est une limite constante que rien ne peut dépasser. Du coup, si l'on remplace le touriste et le marin de Galilée par une étoile et le phare d'un vaisseau spatial filant à vive allure, la lumière émise par ces derniers couvrira exactement la même distance dans le même temps. Il y a donc une faille dans le bon vieux principe galiléen !



2. Preuves expérimentales de l'invariance de la célérité de la lumière

• Expérience d'Arago.

Vers 1810, Arago place un prisme sur le trajet de la lumière émise par différentes étoiles. La déviation des rayons lui fournit une mesure de la célérité de la lumière incidente

Activité de modélisation

1 L'expérience d'Arago

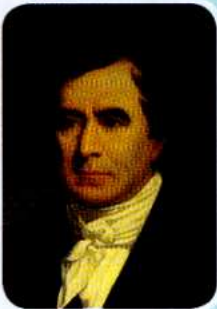
F. Arago a montré au tout début du XIX^e siècle que la célérité de la lumière ne dépendait ni du mouvement de la source ni de celui de l'observateur.

Comment Arago a-t-il procédé ?

Compétences

- ◆ Savoir que la vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels galiléens.
- ⊕ Exprimer le résultat d'une mesure par une valeur et une incertitude ;
- ⊕ Évaluer la précision relative.

A Lumière et mouvement des étoiles



François Arago

L'astronome François Arago (1786-1853) s'intéresse à la vitesse de la lumière. Il cherche en particulier à voir si elle diffère d'une étoile à l'autre et écrit en 1810 :

« Si on se rappelle que la déviation qu'éprouvent les rayons lumineux en pénétrant obliquement dans les corps diaphanes est une fonction déterminée de leur vitesse primitive, on verra que l'observation de la déviation totale à laquelle ils sont assujettis en traversant un prisme fournit une mesure naturelle de leur vitesse.

J'ai mesuré dans la même nuit la déviation que le prisme fait éprouver aux rayons lumineux ; c'est ainsi qu'ont été formés les tableaux ci-contre [doc. 1]. »

D'après F. Arago, « Mémoire sur la vitesse de la lumière », *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 36, 1853.

Notes : diaphane = transparent ; vitesse primitive = vitesse initiale.

1 Mesures par F. Arago de la déviation des rayons lumineux issus d'étoiles lointaines.

Au cercle répétiteur, 8 octobre 1810.

α de l'Aigle, déviation	.....	=	22° 25' 9"
Tache de la Lune	.....	=	22° 25' 9"
α du Verseau	.....	=	22° 25' 2"
α Baleine	.....	=	22° 25' 3"
Aldébaran	.....	=	22° 25' 0"
Rigel	.....	=	22° 24' 59"
α d'Orion	.....	=	22° 25' 2"
Sirius	.....	=	22° 25' 8"

1. À quelle grandeur la mesure de l'angle de déviation du prisme donne-t-elle accès ?
2. a. ⊕ Grâce à une calculatrice ou un tableur, exprimer le résultat de la mesure de la déviation par une valeur moyenne, et un écart-type [fiche 9 p. 325].
b. ⊕ Évaluer l'incertitude relative de cette mesure.

B Lumière et mouvement de la Terre

« Arago essaie de détecter une variation éventuelle de la vitesse de la lumière lorsque la Terre se rapproche ou s'éloigne de l'étoile. Il fait l'hypothèse implicite, alors considérée comme évidente par tous, que la vitesse de la Terre s'ajoute ou se retranche simplement à la vitesse de la lumière.

Arago doit donc chercher si l'angle de déviation par un prisme de la lumière de l'étoile varie à différentes époques de l'année pour une même étoile, la vitesse de la Terre étant alors orientée différemment par rapport à la direction de l'étoile. Si la vitesse de la lumière s'était composée simplement avec celle de la Terre, Arago aurait pu détecter l'effet de ce mouvement sur la vitesse de la lumière. Il n'a rien observé de tel. »

D'après J. Lequeux, « Les expériences d'Arago sur la vitesse de la lumière (1810) », www.bibnum.fr.

S'informer

Il y a 60 **minutes d'arc** (') dans un degré (°) et il y a 60 **secondes d'arc** (") dans une minute d'arc ('). Le centre de la Terre met un an pour décrire approximativement un cercle de rayon $d_{TS} = 150 \cdot 10^9$ m autour du Soleil. La vitesse de la lumière dans le vide est $c = 3,00 \cdot 10^8$ m · s⁻¹.

3. Faire un schéma dans le référentiel héliocentrique (où le Soleil est fixe) pour expliquer comment pourraient se « composer » les vitesses (celle de la lumière et celle de la Terre) à deux moments de l'année.
4. Dans « l'hypothèse implicite que la vitesse de la Terre s'ajoute ou se retranche simplement à la vitesse de la lumière », déterminer un ordre de grandeur de :
a. la variation maximale présumée de la vitesse de la lumière sur Terre ;
b. la variation relative de la vitesse de la lumière.
5. ⊕ En comparant cette variation relative à l'incertitude relative de la mesure de la question 2.b, expliquer pourquoi la méthode d'Arago devait lui permettre de détecter l'effet du mouvement de la Terre sur la vitesse de la lumière.

Conclure l'activité

6. La vitesse de la lumière dépend-elle :
a. de la source (ici l'étoile) ?
b. du récepteur (la Terre à différents moments de l'année) ?

• Expérience de Michelson et Morley

Étude de documents

L'expérience de Michelson et Morley

La vitesse d'un objet dépend du référentiel d'étude. À la fin du XIX^e siècle, deux physiciens américains, Albert Michelson et Edward Morley (Fig. 1), cherchent à appliquer à la lumière la relativité du mouvement de la physique classique.

La Terre tourne autour du Soleil avec une certaine vitesse. Si une lumière est émise dans la même direction et le même sens que cette vitesse, un observateur terrestre, qui a la même vitesse que la Terre, devrait alors pouvoir observer la lumière se déplacer avec une vitesse inférieure à celle d'une lumière émise, par exemple, dans une direction perpendiculaire.

Michelson et Morley conçoivent un dispositif dans l'espoir de mettre en évidence ce phénomène.

Ce dispositif consiste à faire interférer deux faisceaux lumineux, issus d'une même source, après leur avoir fait parcourir des trajets aller-retour égaux dans deux directions perpendiculaires grâce à des miroirs (Fig. 2). La figure d'interférences obtenue en sortie se déforme si la lumière prend du retard dans l'une des directions : soit parce que la distance parcourue est différente, soit parce que la vitesse de la lumière est différente.

Les deux physiciens s'attendent à voir se modifier la figure d'interférences, visible au niveau du détecteur, en faisant tourner le dispositif sur lui-même, ce qui mettrait en évidence l'existence de différentes valeurs possibles de la vitesse de la lumière. Le résultat est inattendu : la figure d'interférences reste inchangée. Michelson et Morley sont alors forcés d'admettre que la vitesse de la lumière reste résolument constante, ce qui est en contradiction avec la physique de l'époque et la relativité du mouvement admise jusqu'alors.

Dans un premier temps, personne ne saura expliquer cette découverte, qui reste l'une des plus importantes et des plus célèbres de l'histoire de la physique. Elle vaudra à Michelson, qui était à l'initiative de l'expérience, le prix Nobel de physique en 1907.

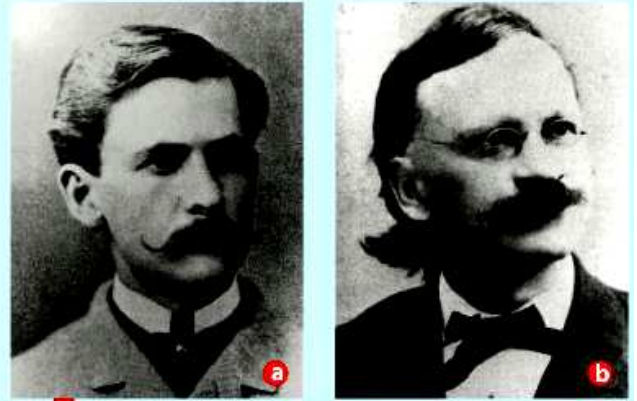


Fig. 1 a Albert Michelson (1852-1931) et b Edward Morley (1838-1923).

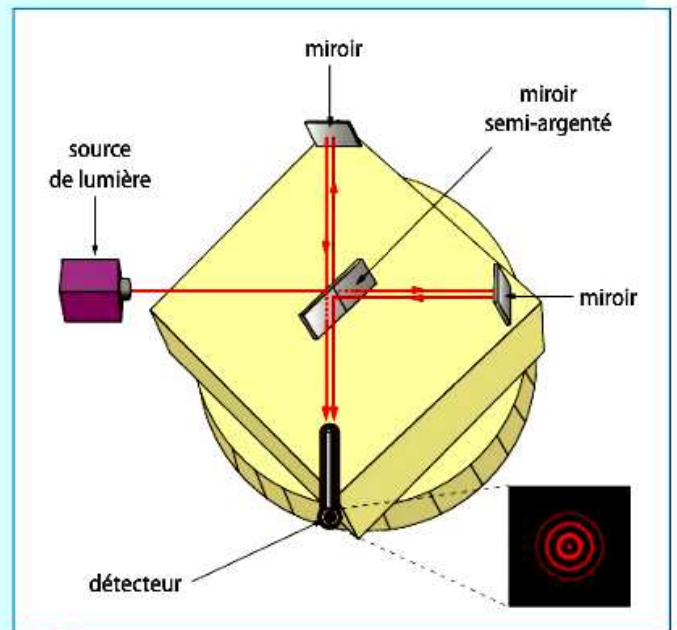


Fig. 2 Dispositif de l'expérience.

Pistes de réflexion

- 1 a. Quel est initialement le but de l'expérience mise en œuvre par Michelson et Morley ?
b. En quoi le dispositif expérimental mis en œuvre peut-il permettre d'atteindre l'objectif fixé ?
- 2 a. Quel est l'intérêt du miroir semi-argenté ?
b. Comment doit-il être positionné dans le dispositif ?
- 3 a. Quels phénomènes optiques sont ici utilisés ?

b. Quels sont les paramètres identifiés par Michelson et Morley qui peuvent avoir une influence sur le phénomène étudié ?

Pour conclure

- 4 a. Quel résultat important et imprévisible Michelson et Morley ont-ils mis en évidence grâce à leur expérience ?
b. En quoi ce résultat est-il en contradiction avec la physique classique étudiée jusque-là ?

CORRECTION

• Expérience d'Arago.

► **Activité 1** p.186

En 1810 à l'Observatoire de Paris, Arago mit au point une expérience permettant de comparer la vitesse de la lumière émise par différentes étoiles, à différentes époques de l'année. Cela devait normalement lui permettre de mettre en évidence l'influence du mouvement de la Terre.

Cette activité permet d'introduire le paradigme en vigueur à l'aube du XIX^e siècle, en particulier la loi classique de composition des vitesses, et de montrer comment un modèle peut être mis en défaut.

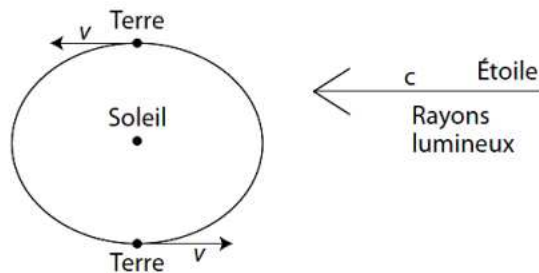
Elle permet aussi d'insister sur l'inévitable dispersion des mesures expérimentales et donc sur la nécessité de leur traitement statistique.

Matériel

Calculatrice ou ordinateur avec tableur-grapheur.

✓ **Réponses aux questions**

1. Selon Arago, l'angle de déviation du prisme donne accès à la vitesse de la lumière émise par l'étoile et reçue par l'expérimentateur mais n'en donne pas l'explication.
2. a. Valeur moyenne : $22,41778^\circ$, écart-type : $0,00113^\circ$.
b. L'incertitude relative de la mesure est : $5 \cdot 10^{-5}$.
3. La vitesse de la lumière arrivant sur Terre vaut $c + v$ en haut du schéma, ou $c - v$ en bas du schéma.



5. Comme la précision relative des mesures précédentes est plus faible, la mesure d'Arago aurait été sensible au mouvement de la Terre.
6. La vitesse de la lumière ne dépend ni de la source (l'étoile) ni du récepteur (la Terre à différents moments de l'année).

• Expérience de Michelson et Morley

ACTIVITÉ 2

La vitesse de la lumière en question p. 217

1. a. Au départ, le but de l'expérience de Michelson et Morley a été d'appliquer la relativité de mouvement à la lumière.
b. Le dispositif permet de comparer la durée d'un trajet identique effectué par deux faisceaux lumineux : l'un correspond à une lumière se propageant dans la direction du mouvement de la Terre et l'autre à une lumière se propageant dans une direction perpendiculaire.
2. a. L'intérêt d'un miroir semi-argenté est qu'il permet à un faisceau incident d'être en partie réfléchi et en partie transmis.

b. Dans le dispositif, le miroir semi-argenté doit être incliné de 45° pour que les faisceaux réfléchis et transmis soient perpendiculaires.

3. a. Le phénomène optique utilisé ici est le phénomène d'interférence.

b. Les paramètres identifiés par Michelson et Morley qui peuvent avoir une conséquence sur le phénomène étudié sont :

- le retard de propagation ;
- la distance parcourue.

4. a. La vitesse de la lumière est un invariant.

b. Ce résultat est en contradiction avec la physique classique connue jusque-là où le mouvement est relatif, autrement dit où la vitesse d'un système d'étude dépend du référentiel.

3. Postulat d'Einstein

La théorie de la relativité restreinte d'Albert Einstein (1905) est fondée sur l'invariance de la célérité de la lumière :

La lumière se propage avec la même célérité $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ dans le vide, quel que soit le référentiel d'étude.

Aucune particule ne peut acquérir une vitesse supérieure à la célérité de la lumière dans le vide.



Dans un milieu matériel, en revanche, leur vitesse peut être plus grande que la vitesse de la lumière dans ce milieu, c'est le cas notamment des particules créant cette lumière bleue dans l'eau d'un réacteur nucléaire, elles se déplacent plus vite que la lumière dans l'eau.

II. Référentiel et horloge

1. Principe de relativité (Galilée 1638)

La théorie de la relativité d'Einstein est aussi fondée sur le principe de la relativité fondé en 1638 par Galilée :

Les lois des phénomènes physiques sont identiques dans deux référentiels galiléens

- **Exemple :**

Du thé versé dans une tasse s'écoule de la même façon chez soi ou dans un train à vitesse constante sur une voie rectiligne : aucune expérience effectuée à l'intérieur du train ne permet de savoir si celui-ci se déplace ou pas

- **Remarque :**

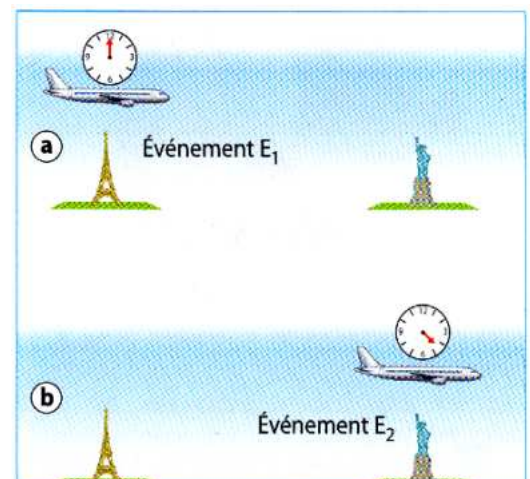
Si un référentiel R' est en translation rectiligne uniforme par rapport à un référentiel galiléen R , alors R' est galiléen lui aussi

2. Notion d'évènement

Un événement est un phénomène qui se produit en un endroit précis dans l'espace, à un instant donné dans le temps.

- **Exemple :**

Le passage d'un avion au-dessus de la Tour Eiffel définit un événement E_1 et son passage au-dessus de la Statue de la Liberté un événement E_2



10 Deux événements définis par le passage de l'avion au-dessus : (a) de la Tour Eiffel ; (b) de la Statue de la Liberté.

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 .

• **Exemple :**

Les deux événements E_1 et E_2 définis précédemment ont lieu au même endroit dans le référentiel de l'avion, référentiel propre vis-à-vis de ces 2 événements.
Une horloge embarquée dans l'avion est capable de mesurer la durée propre entre ces deux événements.

Le temps propre est celui indiqué par l'horloge associée au référentiel propre

3. La mesure du temps

Une durée est l'intervalle de temps mesuré par l'horloge d'un référentiel entre deux événements.

L'horloge associée au référentiel indique une date : c'est la durée écoulée depuis une origine des dates $t = 0$ arbitrairement choisie.

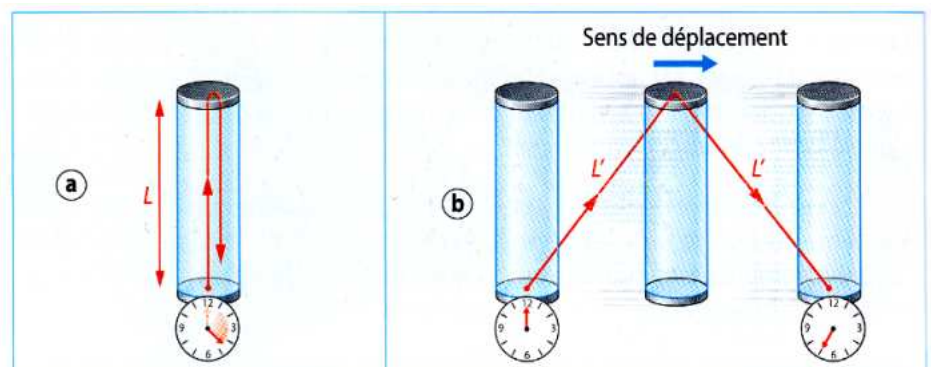
III. Relativité du temps

1. Caractère relatif des durées

Dans une « horloge à lumière », une impulsion lumineuse effectue un va-et-vient entre deux miroirs parallèles distants d'une longueur L . L'ensemble est placé à l'intérieur d'un tube, embarqué dans une fusée se déplaçant horizontalement.

La mesure de la durée se fait entre deux événements : l'envoi de l'impulsion lumineuse et sa réception. Ces deux événements ont lieu :

- au même endroit dans le référentiel R de la fusée : c'est le référentiel propre (doc. a)
- à des endroits différents dans le référentiel de la Terre, qui n'est donc pas le référentiel propre (doc. b)



- 13** Une « horloge à lumière ». La lumière parcourt une distance
- [a] $2L$ dans le référentiel R de la fusée embarquant le dispositif ;
 - [b] $2L' > 2L$ dans le référentiel R' de la Terre.

Du fait de l'invariance de la célérité de la lumière, l'intervalle de temps entre deux événements mesurés dans deux référentiels différents ne peut pas être identique : la durée mesurée dépend du référentiel

• **Démonstration :**

La durée mesurée dans le référentiel R de la fusée est $\Delta t = \frac{2L}{c}$, où $2L$ est la distance parcourue par la lumière dans R.

RAPPEL :
 Vitesse = $\frac{\text{distance}}{\text{temps}}$
 $v = \frac{d}{\Delta t}$

Dans le référentiel terrestre R', la durée est $\Delta t' = \frac{2L'}{c}$, où $2L'$ est la distance parcourue par la lumière dans R'.

Comme : $2L' > 2L$ alors : $\frac{2L'}{c} > \frac{2L}{c}$ donc : $\Delta t' > \Delta t$

Le temps passe moins vite à bord de la fusée que sur Terre
 On vieillit donc moins vite dans la fusée que sur la Terre

2. Dilatation des durées

L'intervalle de temps propre Δt_0 entre deux événements, mesuré dans le référentiel propre galiléen R, est toujours plus court que l'intervalle de temps $\Delta t'$ entre ces mêmes événements mesuré dans un autre référentiel galiléen R', se déplaçant à la vitesse v par rapport à R :

$$\Delta t' = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} > \Delta t_0$$

- $\Delta t'$: intervalle de temps mesuré dans un autre référentiel galiléen R' se déplaçant à la vitesse v par rapport à R (s)
- Δt_0 : intervalle de temps propre Δt_0 entre deux événements mesuré dans le référentiel propre galiléen R (s)
- v : Vitesse de déplacement de R' par rapport à R
- c : Vitesse de la lumière dans le vide ($m.s^{-1}$)

• **Mise en évidence de la relation**

L'expérience de pensée suivante permet de déterminer la relation entre durée propre et durée mesurée.

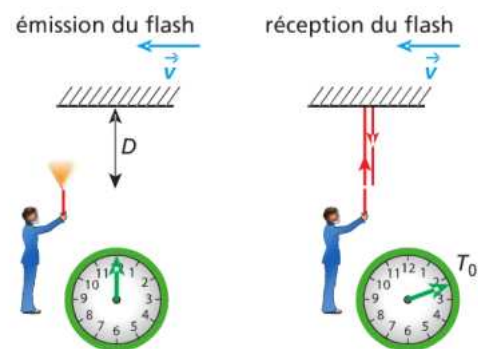
Un observateur émet un flash lumineux devant un miroir, en mouvement de translation rectiligne et uniforme à la vitesse \vec{v} dans le référentiel de l'observateur, à une distance D constante de lui (Fig. 7).

• Dans le référentiel de l'observateur (Fig. 7.a), la distance parcourue par la lumière lors d'un aller-retour est $2D$.

La durée T_0 d'un aller-retour du flash lumineux vérifie donc, dans ce référentiel, où la célérité de la lumière est c, la relation $c = \frac{2D}{T_0}$.

La durée T_0 s'écrit donc $T_0 = \frac{2D}{c}$.

C'est la durée propre entre l'émission et la réception du flash, puisque ces deux événements ont lieu au même endroit dans ce référentiel.



a. dans le référentiel de l'observateur.

- Dans le référentiel du miroir (Fig. 7.b), si T est la durée de l'aller-retour, l'observateur s'est déplacé de la distance $d = \frac{vT}{2}$ lorsque le flash va de l'observateur au miroir. La distance parcourue par la lumière, dans ce référentiel, pour aller de l'observateur au miroir, est $D' = \sqrt{D^2 + d^2}$ soit $D' = \sqrt{D^2 + \left(\frac{vT}{2}\right)^2}$ (Fig. 8).

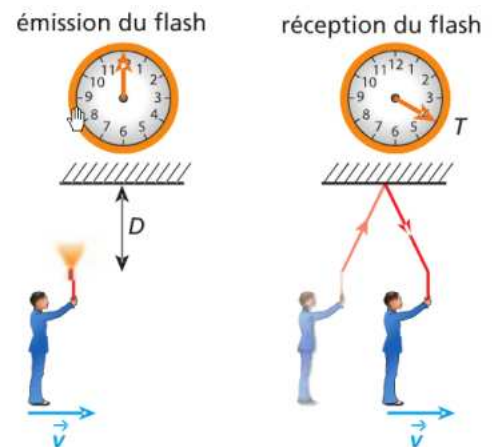
Comme la vitesse de la lumière est également c dans ce référentiel, la durée d'un aller-retour T vérifie $c = \frac{2D'}{T}$, ce qui donne :

$$T = \frac{2D'}{c} \text{ soit } T = \frac{2}{c} \sqrt{D^2 + \left(\frac{vT}{2}\right)^2}$$

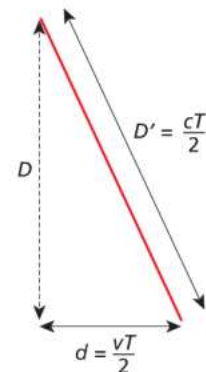
La relation s'écrit également : $\left(\frac{cT}{2}\right)^2 = D^2 + \left(\frac{vT}{2}\right)^2$

Comme $D = \frac{cT_0}{2}$, cela donne : $\left(\frac{cT}{2}\right)^2 = \left(\frac{cT_0}{2}\right)^2 + \left(\frac{vT}{2}\right)^2$

Ceci se simplifie selon $(c^2 - v^2)T^2 = c^2T_0^2$, ou encore $T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$



b. dans le référentiel du miroir.

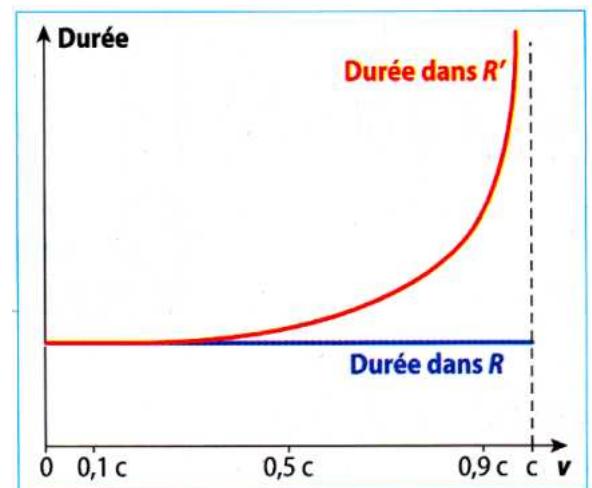


- **Remarque :**

Les intervalles de temps sont quasi identiques tant que les référentiels se déplacent à des vitesses faibles devant la célérité de la lumière, mais les différences sont sensibles dès que v devient proche de c

Ainsi, du fait du mouvement relatif des deux référentiels, il apparaît une dilatation apparente des durées d'autant plus sensible que v est proche de c .

L'expression de $\Delta t'$ montre que v ne peut pas dépasser c .



14 Évolution de la durée avec la vitesse v du référentiel R' par rapport à R , référentiel propre.

• Preuve expérimentale

L'expérience des physiciens Bruno Rossi et David Hall, en 1941, est la première preuve expérimentale de la dilatation des durées (Fig. 10).

Elle consiste à compter le nombre de muons détectés en une heure au sommet d'une montagne ainsi qu'au niveau de la mer.

Les muons sont des particules produites dans la haute atmosphère (dues au bombardement des protons cosmiques) qui se désintègrent spontanément pour donner d'autres particules.

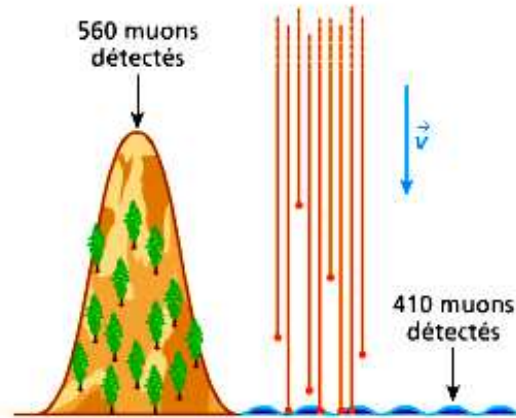


Fig. 10 Expérience de Rossi et Hall.

Dans un référentiel où ils sont au repos, ils se désintègrent de sorte que la moitié des muons a disparu au bout d'une durée $T_0 = 1,5 \mu\text{s}$. Dans le référentiel terrestre, le trajet des muons entre l'altitude du sommet de la montagne et le niveau de la mer dure $6,4 \mu\text{s}$. Cette durée est supérieure à $4T_0$ donc, sans considération relativiste, il faudrait s'attendre à ce que la population de muons soit divisée plus de quatre fois par 2 pendant cette durée. Or, lorsque 560 muons étaient détectés en altitude, 410 étaient détectés au niveau de la mer. Sans considération relativiste, il est impossible d'expliquer pourquoi autant de muons atteignent la Terre. La durée entre les deux événements « *Le muon est au sommet de la montagne* » et « *Le muon atteint le niveau de la mer* » est une durée propre pour le muon, mais une durée impropre pour un observateur terrestre. La vitesse de ces particules étant $v = 0,995c$, le temps nécessaire, dans le référentiel terrestre, pour que la moitié des muons disparaissent est :

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1,5}{\sqrt{1 - 0,995^2}} = 15 \mu\text{s}.$$

Au bout de $6,4 \mu\text{s}$, il est donc normal qu'il en reste plus de la moitié.

3. Pour aller plus loin

A l'instar des durées, les longueurs sont affectées par le mouvement de celui qui les mesure, Ainsi, la valeur maximale que peut prendre la longueur d'un objet donné est celle qui est mesurée dans le référentiel où celui-ci est immobile. On l'appelle longueur propre. Le mouvement provoque une contraction des longueurs.