

La notion de temps dans l'Univers : sens commun ou défi au sens commun ?

I Introduction : relativité du mouvement

Document 0 : rappel, notion de référentiel

Lorsqu'on étudie le mouvement d'un objet, il s'agit toujours d'observer son mouvement par rapport à un objet de référence. On munit l'espace d'un repère d'espace avec une origine et axes (espace 3D) dans lequel l'objet de référence est fixe (souvent le repère d'espace est pris au centre de l'objet de référence). Pour observer les variations de la position de l'objet désiré dans cet espace, on munit le temps d'un repère de temps avec une origine (temps initial égale à 0) et un axe orienté vers le futur. Munir l'espace-temps d'un repère d'espace et d'un repère de temps, c'est choisir un

Document 1 : L'évolution des idées en physique, Albert Einstein et Léopold Infeld

p. 144 à 154 à relire rapidement

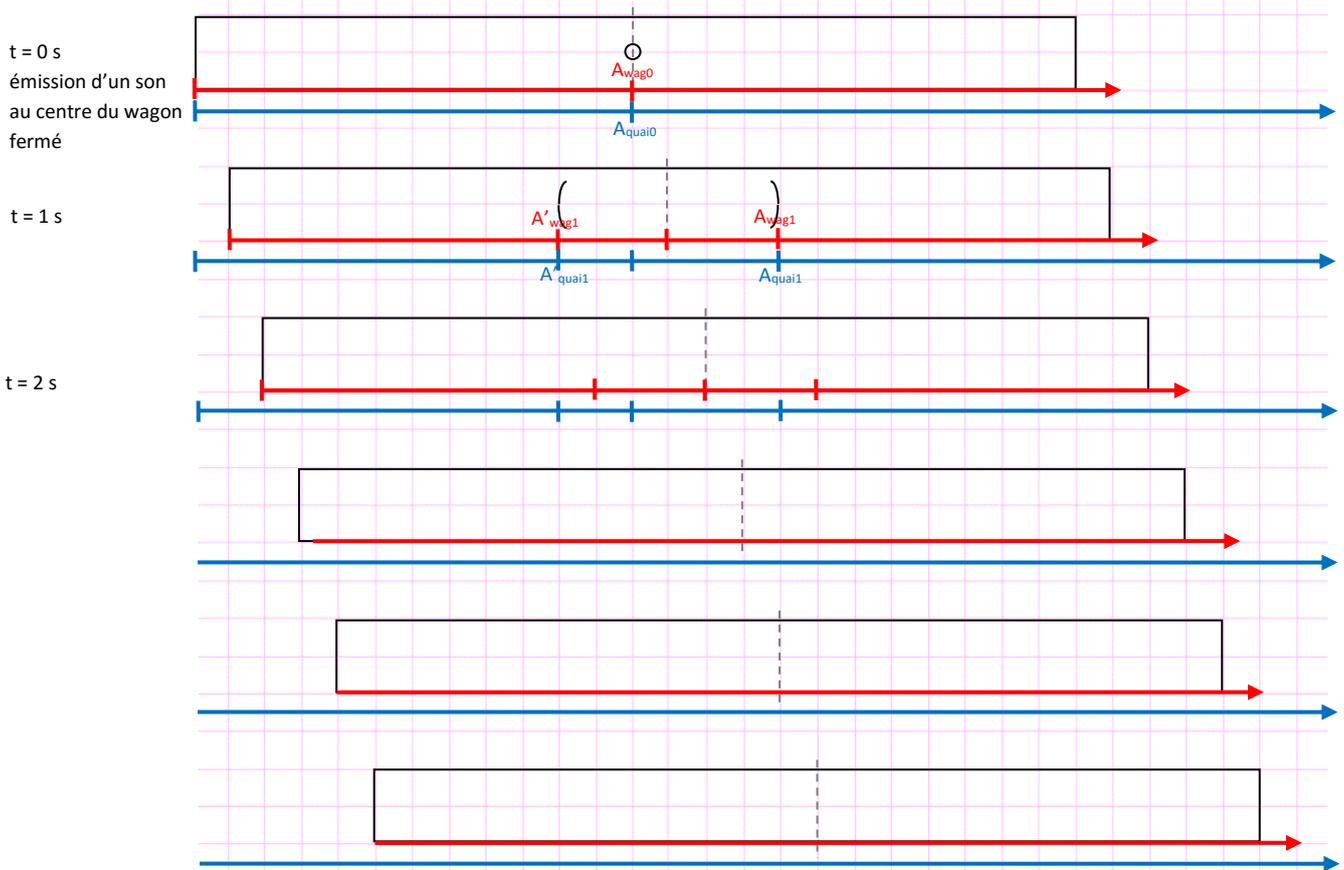
Document 2 : L'évolution des idées en physique, Albert Einstein et Léopold Infeld

p. 155 « Supposons que nous soyons assis dans une chambre si isolée... » à p. 156 « ... explosion du canon »

Document 3 : son émis dans un wagon fermé en mouvement par rapport au quai, avec une vitesse $v_{\text{wagon}} = 100 \text{ m.s}^{-1}$ par rapport au quai pour les commodités de l'expérience

On distinguera trois référentiels : celui lié au quai, celui lié au wagon (avec l'air à l'intérieur immobile dans ce cas), et celui lié à l'air où se propage le son.

Un carreau représente 100 m. (La longueur du wagon n'est pas réaliste mais permet de visualiser davantage les phénomènes).



2) Application aux ondes sonores

On prendra comme valeur approchée de la vitesse du son $v_{\text{son}} = 300 \text{ m.s}^{-1}$.

a) A quelle condition sur le milieu l'onde sonore peut-elle s'y propager ?

b) Pour les deux cas envisagés sur les documents 3 et 4, dans quel(s) référentiel(s) précisément cette vitesse a-t-elle la valeur indiquée ?

c) i) D'après le document 2, justifier le 2^{ème} schéma du document 3 qui a été complété.

ii) Compléter le reste du document 3 en ajoutant en bleu, sur l'axe des abscisses dont est munis le référentiel du train, l'origine de l'axe et les positions du front de l'onde sonore (à gauche et à droite de la source sonore) aux différents instants dans ce référentiel (en reportant les anciennes positions sur chaque nouveau schéma) ; et en rouge, les positions du front de l'onde sonore sur l'axe des abscisses dont est munis le référentiel du quai pour les différentes dates. Utiliser les notations indiquées. En déduire si la vitesse du son est la même dans les deux sens suivants le référentiel choisi (quai et wagon) en évaluant numériquement les valeurs correspondantes en m.s^{-1} (littérale puis AN). Qui est atteint dans ce cas le plus rapidement : l'avant ou l'arrière du wagon ?

d) Faire la même étude complète dans le cas du document 4.

L'expérience de la vie courante montre que les deux descriptions, intuitives, des documents 3 et 4, est vraie. Le raisonnement tenu n'est pas faux pour les vitesses comme celles du son et les conclusions non plus : la vitesse du son dépend du référentiel, elle vaut 300 m.s^{-1} (dans l'exemple) dans le référentiel lié au milieu de propagation du son (wagon pour document 3 et quai pour document 4), mais elle est différente dans d'autres référentiels.

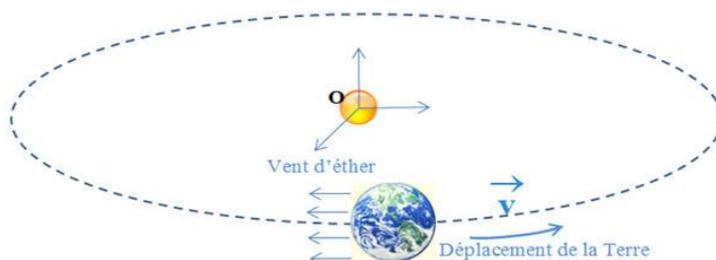
Qu'en est-il pour une onde lumineuse ?

II Les postulats de la relativité restreinte

1) Expérience de Michelson-Morley

Document 5 : L'évolution des idées en physique, Albert Einstein et Léopold Infeld

p. 162 « Nous retournons de nouveau à notre chambre... » à p 164 « de la direction du mouvement de la Terre »



Document 6 : protocole de l'expérience de Michelson et Morley et hypothèses faites au départ

(d'après <http://www.sciencesphysiques2010.esy.es/tsch08.htm>)

Le référentiel d'étude est le référentiel héliocentrique supposé galiléen, c'est le référentiel « absolu » d'Einstein, celui dans lequel la vitesse a pour valeur c .

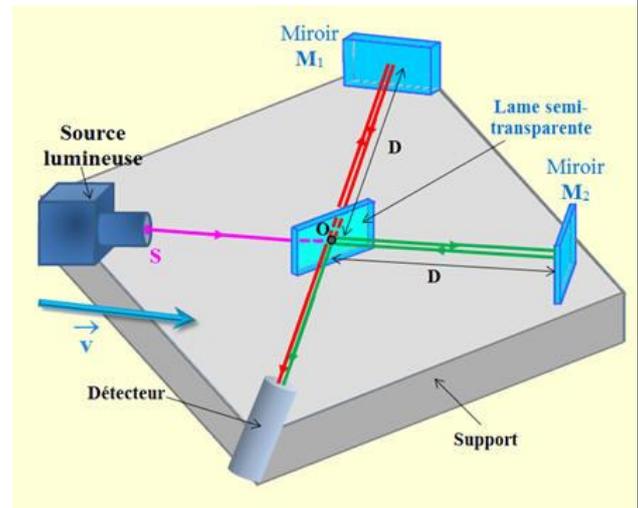
On considère que le référentiel du laboratoire (référentiel terrestre) se déplace d'un mouvement rectiligne uniforme de vitesse $v = 3,0 \times 10^4$ m/s par rapport au référentiel héliocentrique, ceci pendant la durée de l'expérience. Le référentiel du laboratoire est ainsi supposé galiléen.

La lumière émise par la source S rencontre en O le miroir semi-transparent. Une partie de la lumière est réfléchiée vers le miroir M_1 tandis que l'autre partie traverse, le miroir semi-transparent, sans être déviée en direction du miroir M_2 . Les deux miroirs sont exactement à égale distance de la lame semi-réfléchissante, notée D .

Après réflexion, en incidence nulle respectivement sur les miroirs M_1 et M_2 , le même phénomène se produit sur le miroir semi-transparent. Le détecteur permet d'observer le phénomène d'interférence entre les rayons ayant suivi les deux trajets représentés en rouge et en vert.

On se place dans le cas 1 où le support de ce dispositif, fixe sur la Terre, est orienté de telle sorte que l'axe SOM_2 est parallèle à la direction de la vitesse du support par rapport au référentiel héliocentrique. En conséquence, la lumière émise par la source S se propage dans le même sens que de O vers M_2 , mais de sens contraire de M_2 vers O .

Puis Michelson et Morley refont l'expérience en pivotant de 90° le système, M_1 prenant la place de M_2 (cas 2).



- Par analogie avec les ondes mécaniques qui ont besoin d'un support pour se propager, les savants du XVIIIème et du XIXème siècle affecte un fluide sans masse permettant la propagation de la lumière. Quel est son nom ?
.....
- Quel est le but de l'expérience d'Albert-Abraham Michelson et Edward Williams Morley ?
.....
.....
- Dans l'hypothèse de l'éther, la figure du document 5 renvoie à quelle situation vue précédemment : celle du document 3 ou celle du document 4 ? Justifier.
.....
.....
.....
- Par conséquent, quelle est la vitesse de propagation, dans le cas 1, de la lumière lorsqu'elle se dirige de O vers M_2 ? Quelle durée met-elle ? Mêmes questions pour le retour de M_2 vers O . Quelle est la durée totale du trajet OM_2O ?
.....
.....
.....
.....
- Lorsque la lumière passe par le chemin OM_1O , elle est nettement moins affectée par le vent d'éther. Avec toutes des hypothèses, la différence τ entre les durées des deux trajets OM_2O et OM_1O dépend de v , le calcul donnant une différence voisine de $\tau = \frac{D}{c} \times \left(\frac{v}{c}\right)^2$. Les deux faisceaux, à leur rencontre sur le détecteur, présentent donc un décalage temporel donc une différence de marche. Il va y avoir un phénomène d'interférence et la figure d'interférence devrait être affectée par rapport à celle obtenue où les deux faisceaux arriveraient en phase, non affecté par le vent d'éther.
 $D = 10$ m, $v = 3,0 \cdot 10^4$ m.s⁻¹ et $c = 3,0 \cdot 10^8$ m.s⁻¹.
 - Montrer l'homogénéité de la formule donnant τ .
.....
.....
 - Déterminer τ et comparer à la période d'une radiation de longueur d'onde dans le vide $\lambda = 500$ nm. Justifier l'utilité d'un dispositif d'interférences pour mesurer ce décalage attendu.
.....
.....
.....

2) Résultats et conclusion : postulats de la relativité restreinte

- a) Qu'énonce, de façon sous-jacente, comme résultats Einstein en p. 164 pour cette expérience, que ce soit pour le cas 1 ou le cas 2 du document 6 ?

.....
.....
.....
.....
.....
.....

- b) Cela a mené à l'abandon de la notion d'éther. Expliquer comment cette aventure rend-elle compte parfaitement de la démarche scientifique en général avec toutes ses étapes (qu'on rappellera) ?

.....
.....
.....
.....
.....
.....

- c) Einstein va même plus loin en 1905 lorsqu'il énonce les postulats de la relativité restreinte (c'est à dire ne s'appliquant qu'aux référentiels galiléens) Ré-énoncer de manière correcte avec le vocabulaire scientifique d'aujourd'hui ces deux principes énoncés en p. 167. Encadrer et apprendre le premier qui est seul au programme de terminale S

.....
.....
.....
.....
.....
.....

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 et aucune particule. Elle ne peut être atteinte que par des particules de masse nulle comme le photon.

3) Une première difficulté : temps relatif ou temps absolu ?

Document 7 : une expérience de pensée

On considère un vaisseau spatial voyageant en ligne droite à la vitesse $v < c$ dans l'Univers. Le référentiel du vaisseau et le référentiel à l'extérieur du vaisseau sont considérés galiléens (ou « inertiels »). Au temps initial est émis un flash lumineux au centre du vaisseau.

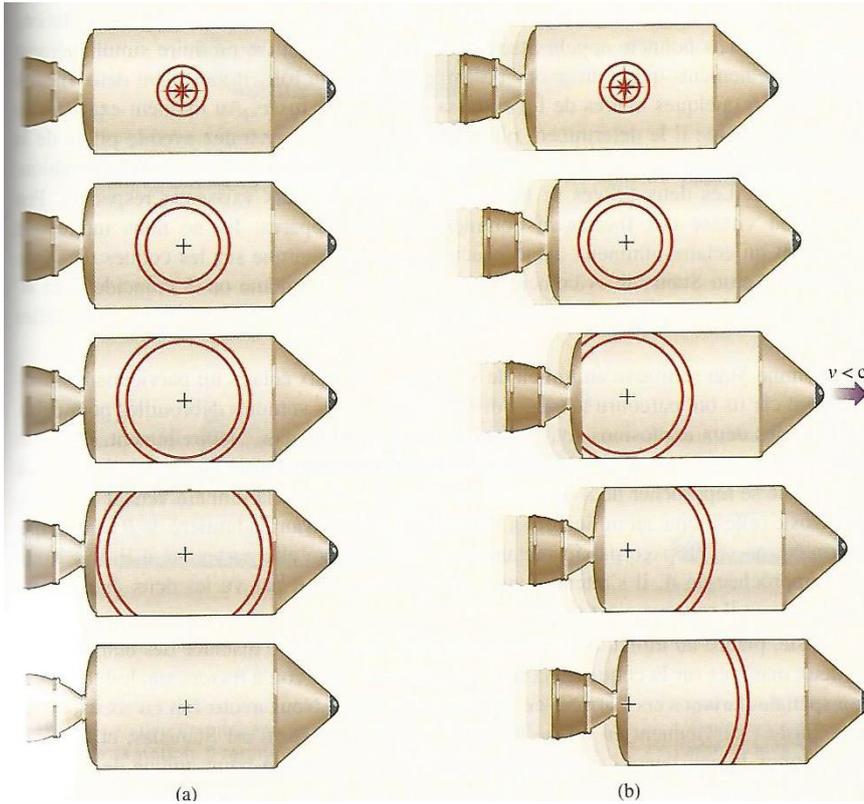


Figure 28.6 Un signal lumineux émis par une source au milieu d'un vaisseau spatial : Dans (a) l'observateur est immobile à l'intérieur du vaisseau et dans (b) le vaisseau se déplace à une vitesse v par rapport à l'observateur extérieur.

(Physique, Hecht, de Boeck, p 1059)

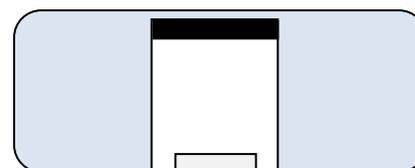
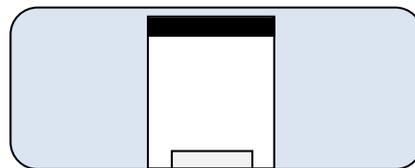
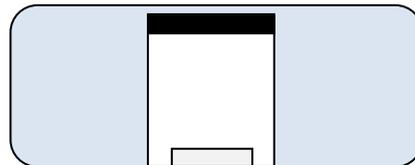
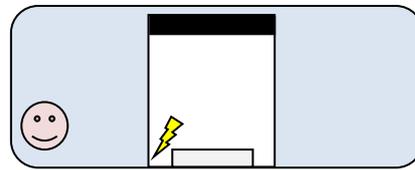
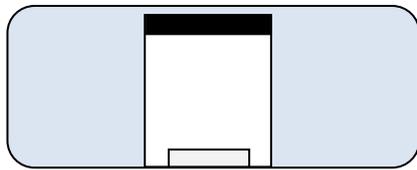
- La série (a) montre l'onde lumineuse visible par quel type d'observateur (quel référentiel est privilégié ?)
- Que dire des événements, dans ce cas, « arrivée de l'onde lumineuse à l'avant du vaisseau » et « arrivée de l'onde lumineuse à l'arrière du vaisseau » ?
- La série (b) montre l'onde lumineuse visible par quel type d'observateur ? (Le vaisseau est ainsi être supposé transparent)
- Que dire des événements, dans ce cas, « arrivée de l'onde lumineuse à l'avant du vaisseau » et « arrivée de l'onde lumineuse à l'arrière du vaisseau » ?
- Les réponses des questions b) et d) sont-elles contradictoires ?

III Conséquence : dilatation des durées

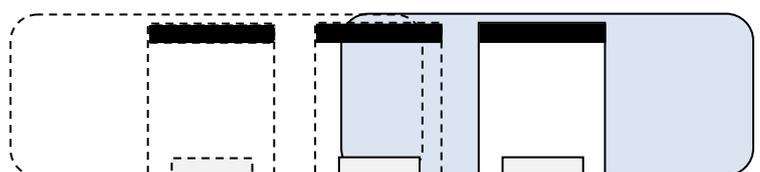
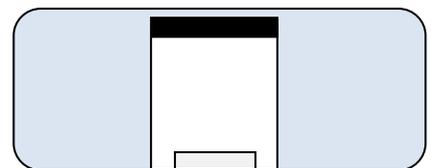
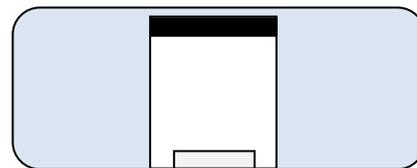
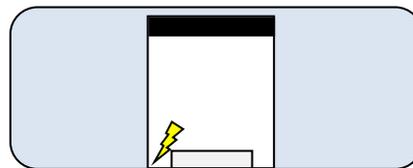
1) Expérience

On considère l'expérience de pensée suivante : Un train est en mouvement rectiligne et uniforme par rapport au quai d'une gare avec une vitesse v . Dans le wagon de ce train se trouve une enceinte où on a fait le vide. Dans cette enceinte est placée au sol une source d'éclairs lumineux et un miroir placé à la verticale de cette source, à une distance h .

A une certaine date, la source émet un éclair lumineux. A une date ultérieure, l'éclair atteint le miroir (et y est réfléchi). A une date encore ultérieure, l'éclair revient sur la source.



Dans le référentiel du



Dans le référentiel du

On désire mesurer la durée du trajet aller-retour de l'éclair. Que faut-il bien préciser ?

2) Du vocabulaire absolument nécessaire

a) Evènement

En relativité, on appelle évènement **UN fait** se produisant en **UN point de l'espace** à **UN instant donné**.

Exemples dans le cas précédent d'évènements :

.....
.....
.....

Parmi les cas suivants, lesquels correspondent à des « évènements » ? Justifier

- un devoir en classe :

- la réception de la voix d'un professeur par deux élèves placés à une distance différente du professeur

- la réception de la voix d'un professeur par deux élèves placés à une même distance du professeur

En relativité restreinte, comme vu précédemment, deux évènements se produisant en deux points de l'espace différents, s'ils sont simultanés dans un référentiel, ne le sont pas en général dans un autre. La notion de référentiel est indispensable.

b) Référentiel et horloge d'un référentiel

Un référentiel est lié à un objet de référence. On associe un repère d'espace dans lequel l'objet est fixe, et un repère de temps. Le temps est mesuré par une **HORLOGE FIXE** dans le référentiel choisi (pendule, autre oscillateur etc.).

L'écoulement du temps dans un référentiel donné est le même en n'importe quel point de ce référentiel. Ainsi, deux horloges **FIXES** placées en deux lieux différents d'un même référentiel, si elles ont été synchronisées à une certaine date, indiquent le même temps. (Ce n'est plus le cas si l'une des horloges a été déplacée !)

Coin des curieux : pour le problème de synchronisation de deux horloges fixes dans un même référentiel, voir « L'évolution des idées en physique » Einstein et Infeld, p.170

L'écoulement du temps dans un référentiel donné n'est pas le même dans un autre référentiel en mouvement par rapport au premier. Ainsi, une horloge **FIXE** placée dans un certain référentiel, même synchronisée, à une certaine date, avec une deuxième horloge **FIXE** dans un deuxième référentiel en mouvement par rapport au premier, n'indiquera plus, ultérieurement à la synchronisation, le même temps que celui de la deuxième horloge.

Dans le cas précédent, combien d'horloges vont devoir être mises en place ?

.....

Les dessiner aux différents instants sur les dessins : une horloge rouge pour celle relative au wagon ; une horloge bleue relative au quai.

c) Durée entre deux évènements se déroulant en un même point d'un certain objet

*Attention, on considère bien **deux évènements se déroulant en un même point d'un certain objet, à deux dates différentes !***

Si on associe à cet objet un référentiel et qu'on y place une horloge **FIXE**, la durée mesurée par cette horloge entre deux évènements se déroulant au sein de cet objet, en un même point, est appelée **durée propre associée à cet objet**, généralement notée Δt_p . Il faut toujours préciser l'objet en question et les deux évènements.

Si on mesure cette même durée avec une horloge fixe dans un autre référentiel que celui de l'objet (et notamment en mouvement par rapport à celui-ci), la durée entre les deux mêmes évènements (qui ne se produisent alors nécessairement pas au même lieu dans le deuxième référentiel), est appelée **durée mesurée associée à ce deuxième référentiel**, généralement notée Δt_m . Il faut toujours préciser les deux évènements et vérifier qu'ils n'ont pas lieu au même endroit dans ce deuxième référentiel.

Point méthode (par cœur) : les trois questions à se poser (sur l'exemple précédent) :

Dans l'exemple précédent, quels sont les deux évènements qui se déroulent (à des dates différentes) au même point de quel objet ?

.....

Quelle va alors être la durée propre concernant (séparant) ces deux évènements ?

.....

Quelle va être la durée mesurée que l'on va étudier concernant (séparant) ces deux évènements ?

.....

3) Lien entre durée propre et durée mesurée

Le lien entre durée propre et durée mesurée est à connaître uniquement si les deux référentiels sont tous les deux galiléens donc si ils ont en l'un par rapport à l'autre.

Démonstration sur l'exemple du flash lumineux à l'intérieur du wagon, le wagon voyageant en mouvement rectiligne et uniforme à la vitesse v par rapport au quai.

1) Dessiner le trajet du photon dans les deux cas sur les deux schémas, celui lié au référentiel wagon (donc source de flash) et celui relié au quai.

2) Dans le référentiel propre de la source d'éclairs lumineux où a lieu les deux évènements départ et retour du photon, donc le wagon, quelle est la vitesse du photon ? Exprimer alors la durée propre Δt_p entre les deux évènements en fonction de h et c . On pourra se mettre à la place du photon, « sentir son trajet » et exprimer sa vitesse...

.....
.....

3) Dans le référentiel du quai, on appelle A le lieu de départ du photon, M le lieu où le photon est réfléchi sur le miroir (en son centre) et A' le lieu de retour du photon sur la source.

a) Dans ce référentiel, A et A' sont-ils confondus ?

Faites figurer A , A' et M sur le dessin relatif au mouvement, sur le dernier dessin de la page précédente correspondante.

b) Quelle est la nature du triangle AMA' ?

c) Dans ce référentiel, à quelle vitesse voyage le photon ? Pourquoi ?

.....
En déduire la longueur AM en fonction de la durée mesurée Δt_m et de c . On pourra se mettre à la place du photon et exprimer sa vitesse...

.....
.....

d) A quelle vitesse voyage le wagon par rapport au quai ?

En déduire la longueur AA' en fonction de la durée mesurée Δt_m et la vitesse v . On pourra cette fois-ci se mettre à la place du wagon et exprimer sa vitesse...

.....
.....

4) En appelant G le projeté de M sur la droite (AA') , exprimer h en fonction de AM et AG puis en fonction de AM et AA' .

.....
.....

5) Remplacer h par cette expression dans l'équation trouvée en 2). Puis remplacer AM et AA' par leurs expressions trouvées en 3)c) et 3d)

.....
.....
.....

6) Montrer alors que Δt_m et Δt_p sont proportionnels et les mettre sous la forme $\Delta t_m = \gamma \Delta t_p$. On exprimera γ en fonction de c et v .

.....
.....
.....
.....
.....
.....

1) Généralisation

Relation entre les deux durées

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.

Ordres de grandeur

Application p 173, déterminer la vitesse de la tige du haut par rapport à celle du bas.

Application : paradoxe des jumeaux

