

**COMPÉTENCES EXIGIBLES**

- 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. LA VITESSE DE LA LUMIÈRE DANS LE VIDE**

App, Ana

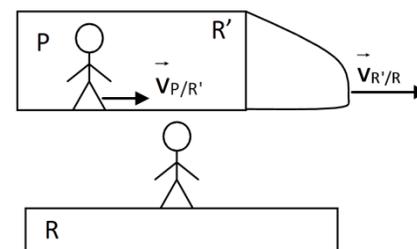
En mécanique classique, la loi de composition des vitesses s'applique aux objets et aux ondes sonores dont les vitesses sont nettement inférieures à celle de la lumière. **Cette loi s'applique-t-elle aux ondes lumineuses ?**

**DOCUMENT 1 : LOI DE COMPOSITION DES VITESSES EN MÉCANIQUE CLASSIQUE**

Une personne immobile sur le quai d'une gare regarde passer un train à la vitesse  $30 \text{ km.h}^{-1}$ . Elle aperçoit un passager P se déplaçant dans la direction du train à la vitesse  $3 \text{ km.h}^{-1}$ .

On note :

- R un référentiel lié à la gare et R' un référentiel lié au train,
- $\vec{v}_{R'/R}$  la vitesse du train par rapport à la gare,
- $\vec{v}_{P/R'}$  la vitesse de P par rapport au train,
- $\vec{v}_{P/R}$  la vitesse de P par rapport à la gare.



En mécanique classique, la loi de composition des vitesses indique que :

$$\vec{v}_{P/R} = \vec{v}_{P/R'} + \vec{v}_{R'/R}$$

**DOCUMENT 2 : RELATIVITÉ GALILÉENNE**

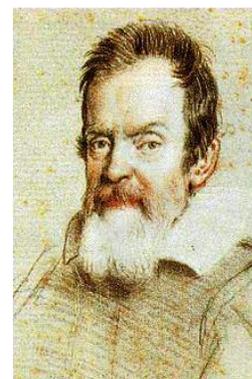
C'est à Galilée (1564 – 1642) que l'on doit la première expression de relativité.

Galilée observe que, enfermé dans la cabine d'un navire sans vue sur l'extérieur, aucune expérience de mécanique ne permet de distinguer si le navire est immobile dans le port ou en mouvement rectiligne et uniforme par rapport au port.

Par ailleurs, sans référence à un objet extérieur, il n'y a aucun moyen de savoir si le navire se déplace ou non.

Selon le principe de relativité galiléenne :

- la vitesse d'un système ne peut être définie que relativement à un référentiel ;
- il n'existe pas de « référentiel absolu » : les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels galiléens.



**DOCUMENT 3 : L'ÉLECTROMAGNÉTISME DE MAXWELL**

La lumière est une onde électromagnétique.

La théorie des ondes électromagnétiques de Maxwell (1831 – 1879) permet de prévoir théoriquement la vitesse des ondes électromagnétique dans le vide indépendamment du référentiel d'étude. Cela induit que quel que soit le référentiel d'étude et quelle que soit la vitesse de la source, la vitesse des ondes électromagnétiques dans le vide vaut  $c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$ .



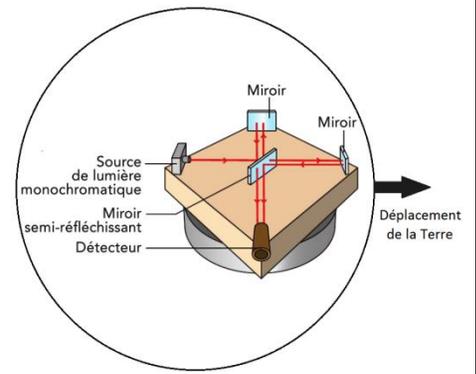
**QUESTIONS :**

1. Si le passager P est assis dans le train, peut-on dire qu'il est immobile ? Expliquer.
2. Lorsque le passager se déplace respectivement vers l'avant du train puis vers l'arrière du train, quelle est sa vitesse par rapport au quai de la gare dans les deux cas ?
3. Le passager P allume une lampe de poche pour éclairer un document placé devant lui. Selon le principe de relativité galiléenne qu'elle est la vitesse de la lumière émise par la lampe par rapport au train ? Par rapport au quai de la gare ?
4. Expliquer pourquoi la réponse précédente n'est pas compatible avec la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell.

#### DOCUMENT 4 : L'EXPÉRIENCE DE MICHELSON ET MORLEY

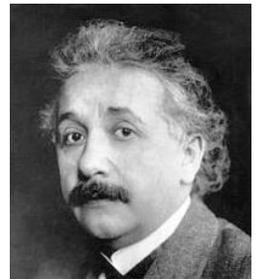
À la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, deux physiciens américains, A. Michelson (1852-1931) et E. Morley (1838-1923) cherchent à mettre en évidence les possibles variations de la vitesse de lumière selon qu'elle se propage dans la direction du mouvement de la Terre ou dans la direction perpendiculaire. Ils conçoivent un appareil, appelé interféromètre, qui permet de séparer une onde lumineuse monochromatique en deux faisceaux qui se propagent dans deux directions perpendiculaires.

Les deux faisceaux parcourent des longueurs légèrement différentes entre le moment où ils sont séparés et le moment où ils se superposent à nouveau, après avoir été réfléchis par des miroirs. Cette différence de longueur et donc de temps de parcours entre les deux faisceaux génère des franges d'interférences alternativement sombres et claires.



#### DOCUMENT 5 : LES POSTULATS D'EINSTEIN

Albert Einstein (1870 – 1952) trouvait incohérent que la mécanique puisse obéir à certaines lois et l'électromagnétisme à d'autres. En 1905, Einstein va étendre le principe de relativité de Galilée à toutes les lois physiques. Il publie la théorie de la relativité restreinte qui repose sur deux postulats :



- « Les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels galiléens ».
- « La vitesse de la lumière dans le vide est indépendante du référentiel d'étude et vaut  $c = 299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  par rapport à tout référentiel galiléen ».

Les postulats d'Einstein sont aujourd'hui toujours admis : aucune expérience n'est jamais venue les remettre en cause.

#### QUESTIONS :

5. Quelle conclusion sur la vitesse de la lumière peut-on tirer de l'expérience de Michelson et Morley ?
6. Quelle loi n'est plus valide pour les ondes lumineuses ?
7. Que peut-on dire de la vitesse de la lumière dans le vide ?

## II. QUAND LES DURÉES SE DILATENT

App, Ana

La relativité restreinte conduit à des conclusions surprenantes dont celle de la dilatation des durées. L'expérience de pensée suivante permet de démontrer la formule de dilatation des durées.

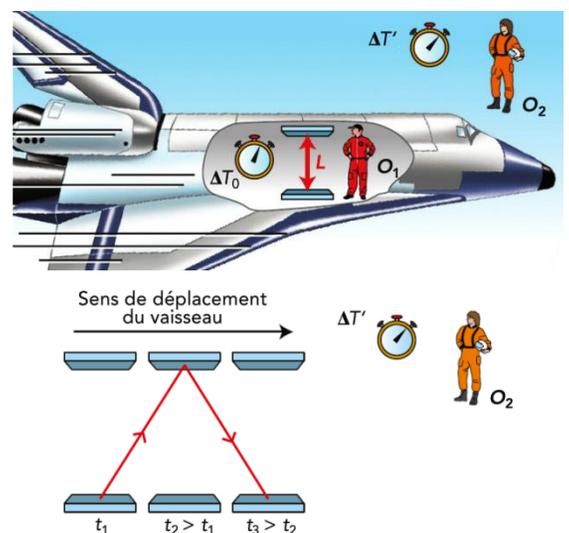
#### DOCUMENT 6 :

Elle utilise une « horloge de lumière » qui est un dispositif imaginaire constitué de deux miroirs plans parallèles entre lesquels les allers-retours d'un faisceau lumineux rythment le temps.

Dans un vaisseau, un observateur  $O_1$ , immobile par rapport à l'horloge de lumière, mesure la durée  $\Delta T_0$ , appelée durée propre, d'un aller-retour de la lumière entre les deux miroirs distants d'une longueur  $L$ . La lumière se déplace à une vitesse de valeur  $c$ .

Un autre observateur  $O_2$ , à l'extérieur du vaisseau, regarde l'horloge de lumière et la voit se déplacer horizontalement à une vitesse de valeur  $v$  constante. Dans le référentiel lié à  $O_2$ , le faisceau de lumière parcourt une distance  $\ell$ , lors d'un aller-retour, plus grande que celle parcourue dans le référentiel galiléen relié à  $O_1$ .

La lumière ayant une vitesse de valeur  $c$  indépendante du référentiel, la durée  $\Delta T'$  d'un aller-retour de la lumière mesurée par  $O_2$  sera différente de  $\Delta T_0$ .



#### QUESTIONS :

8. Pour l'observateur  $O_1$ , exprimer la distance  $L$  d'un aller-retour de la lumière entre les deux miroirs en fonction de  $c$  et de  $\Delta T_0$ .
9. Pour l'observateur  $O_2$ , exprimer la distance  $d$  parcourue par le vaisseau pendant un aller simple de la lumière en fonction de  $v$  et de  $\Delta T'$ .

10. Indiquer sur le second schéma les distances  $d$ ,  $L$  et  $\ell/2$ .  
 Quelle relation existe-t-il entre ces trois longueurs ?  
 En déduire l'expression de la longueur  $\ell$  en fonction de  $d$  et  $L$ .

11. Exprimer la distance  $\ell$  en fonction de  $c$  et de  $\Delta T'$ .

12. À partir des deux questions précédentes, établir une relation entre  $\Delta T'$  et  $\Delta T_0$  et montrer qu'elle s'écrit :

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

13. Pourquoi parle-t-on de dilatation des durées ?

### III. LA RELATIVITÉ RESTREINTE À L'ÉPREUVE DE L'EXPÉRIENCE

App, Ana

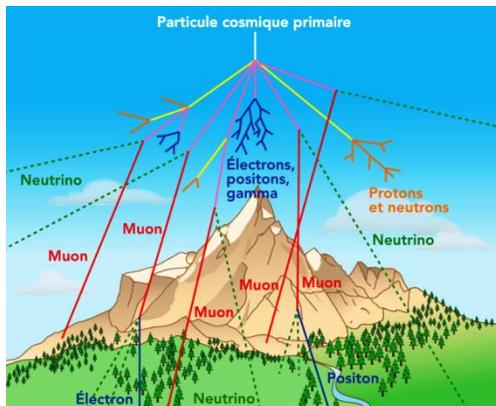
Les muons sont des particules élémentaires produites dans la haute atmosphère. Ces particules ont une durée de vie propre très courte de l'ordre de la microseconde. Cependant on détecte des muons à la surface de la Terre.

**Comment expliquer la détection des muons à la surface de la Terre ?**

#### DOCUMENT 7 : LA PROVENANCE DES MUONS

La Terre est constamment bombardée de particules cosmiques. Lorsque ces astroparticules primaires traversent l'atmosphère, elles interagissent avec les noyaux des molécules présentes dans l'air. Une multitude de particules secondaires sont alors produites et notamment des muons.

Les muons sont des particules élémentaires de même charge que les électrons mais avec une masse 207 fois plus grande. On peut les observer à la surface de la Terre grâce à des détecteurs tels que la chambre à brouillard ou le cosmodétecteur du Centre de Physique des Particules de Marseille.



#### DOCUMENT 8 : DÉTECTION DES MUONS AU NIVEAU DU SOL

Les muons sont créés dans la haute atmosphère vers 10 km d'altitude. Les muons voyagent à une vitesse de valeur très élevée,  $v = 0,998 \times c$  avec  $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  valeur approchée de la vitesse de la lumière dans le vide.

D'après les lois de la mécanique classique, à cette vitesse, il faut  $33 \mu\text{s}$  pour traverser les 10 km d'atmosphère.

On considère deux évènements liés au muon : sa création dans l'atmosphère (évènement noté  $E_1$ ) et sa détection au niveau du sol (évènement noté  $E_2$ ). Dans le référentiel propre lié aux muons, la durée séparant ces deux évènements est la durée de vie moyenne d'un muon soit  $\Delta T_0 = 2,2 \mu\text{s}$ . Dans un référentiel terrestre, la durée mesurée entre ces deux évènements est notée  $\Delta T'$ .

#### QUESTIONS :

14. Retrouver, par le calcul, la valeur  $\Delta t = 33 \mu\text{s}$  indiquée dans le texte pour que les muons traversent les 10 km d'atmosphère.
15. En raisonnant avec les lois de la mécanique classique, devrait-on détecter des muons à la surface de la Terre sachant que leur durée de vie moyenne est de  $2,2 \mu\text{s}$  ?
16. La durée mesurée  $\Delta T'$  et la durée propre  $\Delta T_0$  sont liées par la relation de la dilatation des durées :  $\Delta T' = \gamma \Delta T_0$  (voir II.). Calculer  $\gamma$  dans le cas du muon. Commenter le résultat obtenu.
17. En déduire la durée  $\Delta T'$  séparant les deux évènements pour un observateur terrestre.
18. Comparer  $\Delta t$  et  $\Delta T'$ . Que peut-on en conclure ?
19. En quoi l'observation de muons au niveau du sol est-elle une preuve expérimentale de la pertinence de la relativité restreinte ?