

## Temps et relativité restreinte - cours

- En 1687, Isaac NEWTON publia les Principes mathématiques de la philosophie naturelle, ouvrage majeur dans lequel il exposait sa théorie de la mécanique. Pour lui (et pour nous jusqu'en 1905), « le temps absolu s'écoule uniformément et s'appelle la durée. »
  
- **Le postulat d'Einstein (1879-1955)**  
 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  $c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$  par rapport à tout référentiel galiléen.
  
- Conséquence du postulat d'Einstein : **Le résultat d'une mesure de durée dépend du référentiel dans lequel est effectuée la mesure :**
  - Soit la **durée propre**  $\Delta t_p$  : durée d'un phénomène si elle est mesurée dans un référentiel propre lié à cet objet  $R_p$  (une durée propre concernant un objet est donc une durée mesurée par une horloge immobile dans le référentiel propre de cet objet)
  - Soit la **durée mesurée**  $\Delta t_m$  : durée d'un phénomène si elle est mesurée dans un autre référentiel  $R$ .

$\Delta t_m$  et  $\Delta t_p$  sont liées par l'expression :

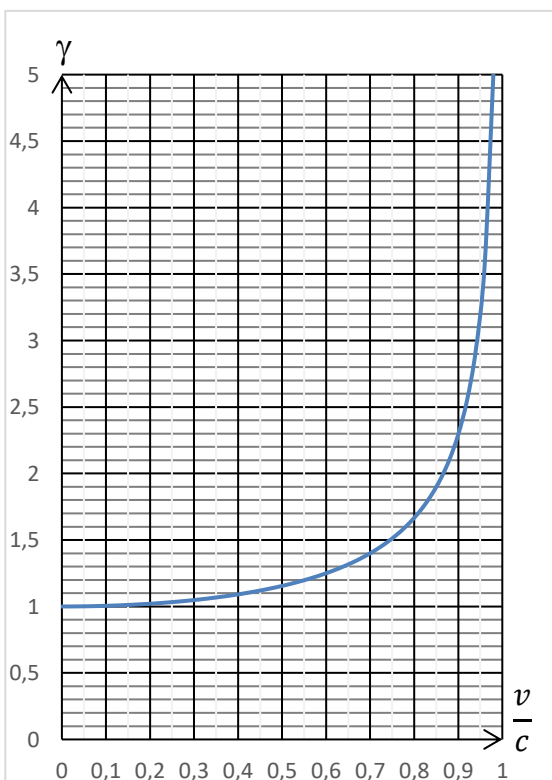
$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_p}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{ou encore} \quad \Delta t_m = \gamma \cdot \Delta t_p \quad \text{avec} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

où  $v$  désigne la vitesse de  $R_p$  par rapport à  $R$ , et  $\gamma$  le coefficient de dilatation des durées.

Comme  $\gamma > 1$ ,  $\Delta t_m > \Delta t_p$  on dit qu'il y a « dilatation des durées » pour un objet en mouvement du point de vue d'un observateur immobile.

Conséquence : le temps s'écoule plus ..... pour l'observateur en mouvement.

### ▪ Limite de la théorie Newtonienne :



On considère que la mécanique newtonienne reste applicable tant que la durée mesurée diffère de moins de 1 % de la durée propre

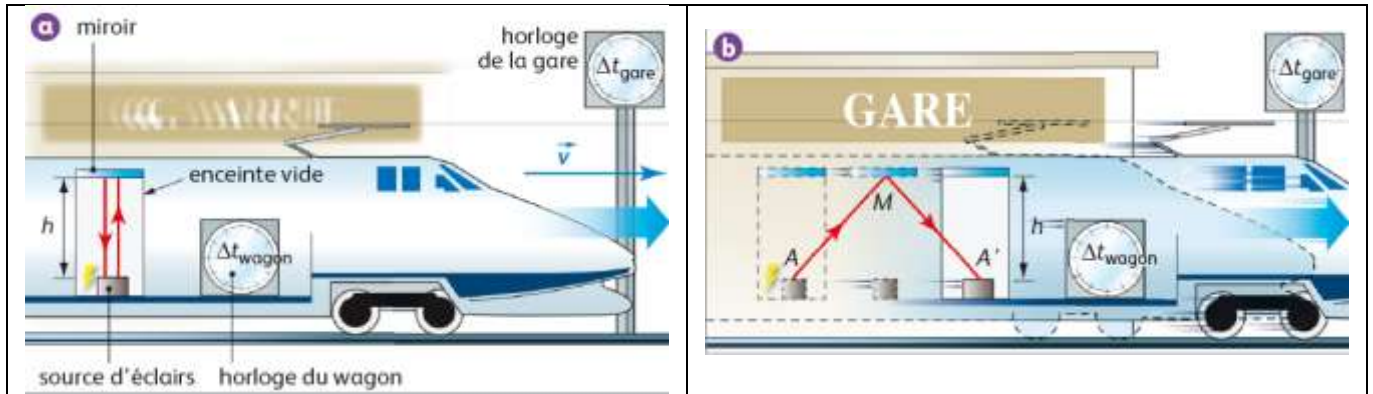
Ceci reste vrai tant que  $\gamma \geq$

Et  $v < c$

# Temps et relativité restreinte - activités

## I. Relation entre durée propre et durée mesurée :

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'éclair 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  $\Delta t_{\text{wagon}}$  de propagation d'un éclair depuis son émission jusqu'à son retour au point de départ (figure a).

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

1. Montrer que la durée  $\Delta t_{\text{gare}}$  de l'aller-retour d'un éclair, mesurée par l'horloge de la gare, est supérieure à la durée  $\Delta t_{\text{wagon}}$  du même aller-retour, enregistrée par l'horloge du wagon.
2. On raisonne en se plaçant dans le référentiel du wagon.  
Exprimer  $h$  en fonction de  $\Delta t_{\text{wagon}}$  et  $c$ .
3. On raisonne maintenant en se plaçant dans le référentiel de la gare :
  - a. Exprimer la distance  $AA'$  en fonction de  $\Delta t_{\text{gare}}$  et de  $v$ , puis les distances  $AM$  et  $A'M$  en fonction de  $\Delta t_{\text{gare}}$  et  $c$
  - b. Exprimer les distances  $AM$  et  $A'M$  en fonction de  $h$  et de  $AA'$ .
4. En déduire que les durées mesurées dans le référentiel du wagon et dans le référentiel de la gare sont liées par la relation :

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

## II. Le paradoxe des jumeaux

Fixe et Mobile sont les prénoms de deux frères jumeaux. Ils habitent la planète Galileo, isolée dans l'Univers, et dont on peut supposer que la surface définit un référentiel galiléen.

A l'âge de 20 ans, tandis que Fixe reste sur Galileo, son frère Mobile, lui monte à bord d'un véhicule qui se déplace à une vitesse  $v=2,0 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ , proche de la célérité de la lumière. Pendant 7 années, il s'éloigne de Galileo.

Pendant les 7 années suivantes, il revient voir son frère. Ces durées sont celles mesurées par Mobile.

1. On admet que la relativité restreinte ne s'applique qu'à condition de choisir le référentiel non galiléen comme référentiel propre.

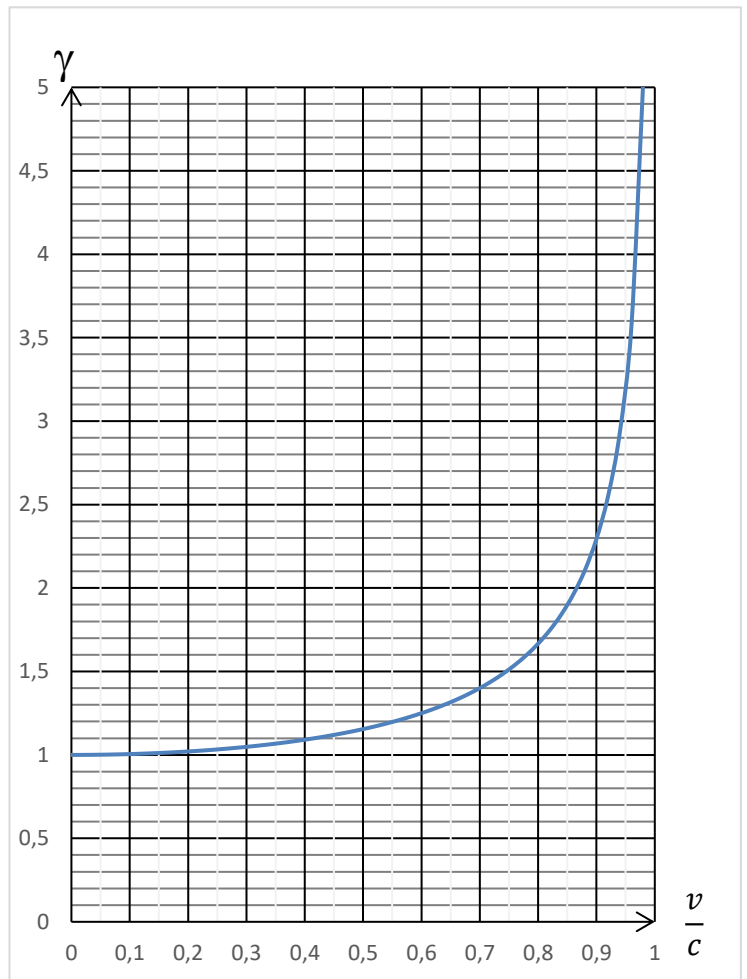
Lequel des deux jumeaux est le plus âgé ?

2. En déduire l'âge de *Mobile* et l'âge de *Fixe* au moment de leurs retrouvailles.
3. Pourquoi peut-on dire que *Mobile* voyage dans le futur ? *Mobile* peut-il revenir dans le passé ?

### III. Limite de la théorie Newtonienne

1. On considère que la mécanique newtonienne reste applicable tant que la durée mesurée diffère de moins de 1 % de la durée propre, ce qui se traduit par  $\Delta t_p > 0,99 \cdot \Delta t_m$   
En déduire le critère sur  $\gamma$  pour que la mécanique newtonienne puisse s'appliquer.

A partir du graphe suivant, définir la vitesse limite au-delà de laquelle on doit tenir compte de la relativité du temps. Conclure quant aux vitesses usuelles.



2. Indiquer si chacune de ces vitesses est relativiste ou non

Horloge embarquée sur...	v (km.h <sup>-1</sup> )	v (m.s <sup>-1</sup> )	Relativiste ?
TGV	300		
Airbus A380	900		
Ariane	8000		
Satellite GPS	14000		
Apollo 11	40000		
Particule $\alpha$		$10^7$	
Electrons dans un microscope électronique		$1,5 \times 10^8$	
Proton accéléré		299762455	

3. Dans les systèmes de positionnement GPS et Galileo, on mesure des durées  $\tau$  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.

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

#### IV. Confirmation expérimentale de la dilatation des durées – durée de vie du muon

Le muon est une particule qui porte la même charge électrique que l'électron, mais avec une masse 207 fois plus grande, c'est pourquoi on l'appelle aussi électron lourd.

Les muons sont produits par l'interaction entre les rayons cosmiques émis par le Soleil et la haute atmosphère de la Terre, à une altitude d'environ 10 km.

Un muon au repos se désintègre en moyenne au bout d'une durée de valeur  $\tau = 2,2 \mu\text{s}$ . Les muons émis dans la haute atmosphère le sont avec une vitesse égale à 99,8 % de la célérité de la lumière dans le vide.

On considère souvent que le fait de pouvoir détecter des muons à la surface de la Terre est une preuve expérimentale de la dilatation des durées. Cette partie propose de comprendre cette affirmation.

1. Pourquoi la durée de vie du muon indiquée dans le texte est-elle sa durée de vie propre ?
2. Calculer la distance parcourue par un muon pendant  $2,2 \mu\text{s}$ .
3. Pourquoi le fait que des muons parviennent à la surface de la Terre est-il une preuve expérimentale de la dilatation des durées ?
4. En tenant compte de la dilatation des durées, calculer la distance que parcourt, en moyenne, un muon, avant de se désintégrer. On prendra bien soin de définir les événements considérés et durée propres et durée mesurée depuis la Terre. Montrer que ce calcul permet d'interpréter le fait de pouvoir détecter des muons à la surface de la Terre.

