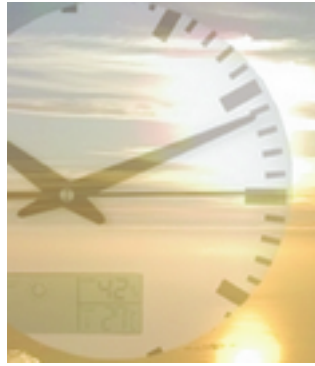


Pendant que le monde bavarde  
 A rien d'important  
 On pourrait dormir sous les  
 arbres  
 Le reste du temps..(F. Cabrel)



## La lumière et le temps

**Mots clés** : événement, célérité, vitesse, galiléen, simultanéité, durée, relativité, dilatation des durées, GPS

### 1) La foudre et l'éclair

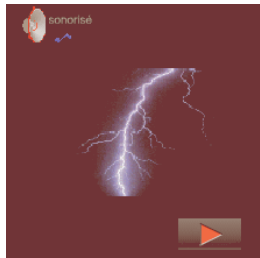
La lumière se déplace à une vitesse  $c = 300000 \text{ km/s}$  ou  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Cette valeur extrêmement élevée est indépendante de la vitesse de la source. C'est un des postulats énoncés par Einstein dans la théorie de la Relativité Restreinte.

Comparons avec la vitesse du son qui est environ de  $300 \text{ m/s}$ .




 La vitesse de la lumière est :

$10^3$	$10^3$	cent mille	$10^5$	$10^6$	mille	un million	un milliard
--------	--------	------------	--------	--------	-------	------------	-------------

de fois plus élevée que celle du son. Choisir la bonne réponse.



Lors d'un orage, lorsque tombe la foudre, si nous sommes situés à  $15 \text{ km}$  du phénomène, nous ne percevons pas l'éclair (signal lumineux) et le tonnerre (signal sonore) en même temps.

-  Du tonnerre ou de l'éclair, lequel nous parvient le premier?
-  De quelle durée sont décalés l'éclair et le tonnerre?
-  La foudre et l'éclair sont ils simultanés? Sinon, quelle durée les sépare?

La durée qui sépare la foudre de l'éclair est si faible que nous avons habitude de considérer ces deux événements comme simultanés. Ce n'est pas le cas de la foudre et du tonnerre.

Retenons :

Un événement est défini par un lieu (coordonnées  $x, y, z,$ ) et l'instant où il se produit ( $t$ ) donc par les coordonnées d'espace-temps ( $x, y, z, t$ )

La foudre est un événement, l'éclair ou le tonnerre sont d'autres événements.

 Quel est le point commun des événements éclair et tonnerre?

A moins d'être à l'impact du coup de foudre (!), nous sommes informés de la foudre par l'éclair. La lumière est le "messenger" de l'événement foudre.

C'est un messenger extrêmement rapide. Extrêmement, signifie qu'aucun autre messenger ne peut aller aussi vite.

**La vitesse de la lumière, dans le vide, est une vitesse limite.** Aucun objet matériel ne peut atteindre cette limite.

C'est pourtant une valeur finie et comme le montre la foudre et l'éclair, cela pose le problème de la simultanéité de deux événements.

La foudre, c'est trop près. Prenons de la distance.

### La nébuleuse du Crabe :



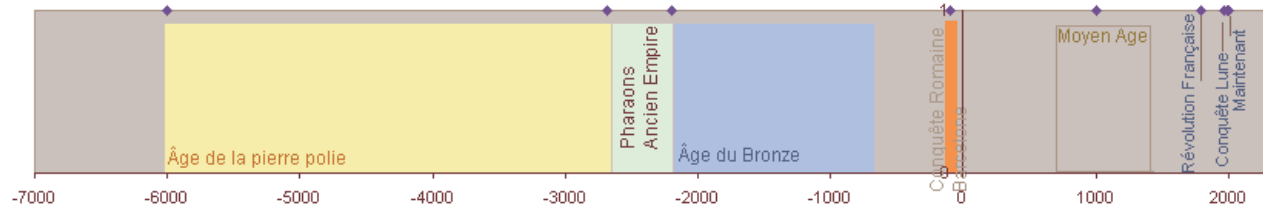
En 1054, les astronomes chinois observent une étoile nouvelle (nova) si lumineuse qu'elle est visible même en plein jour (supernova). Il reste actuellement de cette explosion d'étoile une trace appelée nébuleuse du Crabe.

La nébuleuse du Crabe est située à  $6000$  années-lumière de la Chine.

👉 Qu'est ce qu'une année-lumière?

👉 L'événement observé par les astronomes chinois et l'explosion de l'étoile sont ils simultanés?

👉 Si la photo ci-dessus a été prise vers l'an 2000, situer sur l'échelle chronologique ci-dessous à quelle date la lumière qui a impressionné la photo a été émise :



Ainsi, voir loin, c'est voir dans le passé.  
Espace et temps sont indissociablement liés.  
Voyons également que **temps** et **mouvement** sont également liés.

## 2) Le postulat de la relativité restreinte

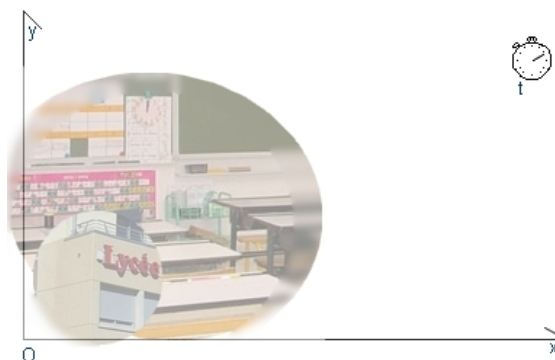
### Référentiels galiléens

Supposons deux observateurs en translation rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre. L'un est dans un vaisseau spatial animé d'une vitesse  $\vec{v}$  par rapport à l'autre (nous même dans la salle de classe).

Les événements sont repérés par le premier à l'aide des coordonnées d'espace  $(x', y')$  et de temps  $t'$ .

Les événements sont repérés par le deuxième à l'aide des coordonnées d'espace  $(x, y)$  et de temps  $t$ .

Ces deux observateurs sont dans des référentiels galiléens différents.



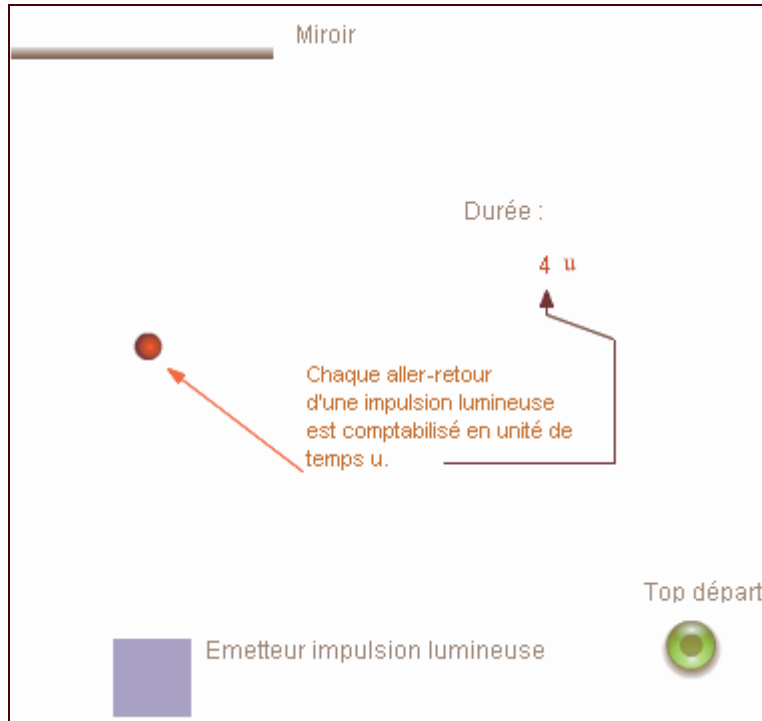
## Invariance de la vitesse de la lumière

Le postulat de la relativité restreinte :

**La vitesse de la lumière est la même dans tous les référentiels galiléens.**

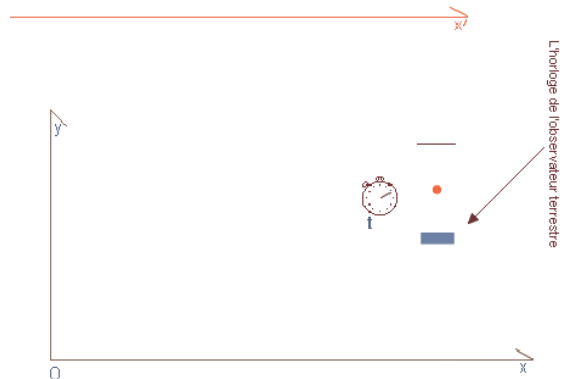
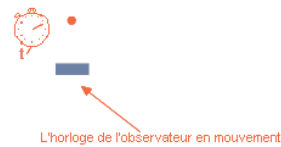
### 3) Une horloge lumineuse :

Imaginons une horloge lumineuse où l'aller-retour d'une impulsion lumineuse sert à mesurer le temps.



Appuyer sur "Top départ pour lancer" l'horloge (se munir d'un casque ou de haut-parleurs)

Les deux observateurs de nos référentiels galiléens ci dessous sont munis de la même horloge.

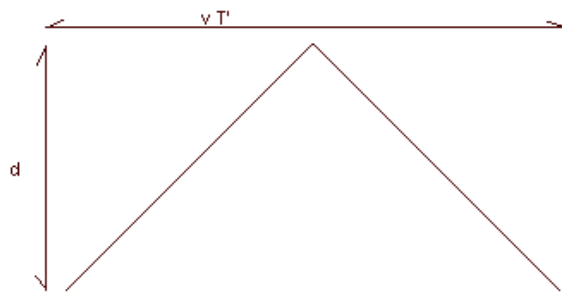


### dilatation des durées :

Plaçons nous du point de vue de l'observateur immobile qui observe l'horloge de l'observateur mobile.

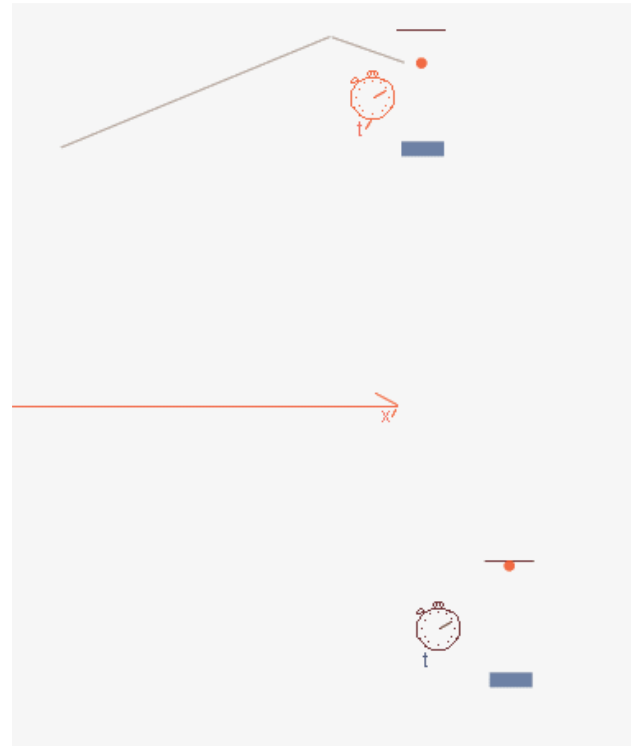
L'aller-retour de l'impulsion lumineuse du référentiel mobile lui apparaît ainsi.

(Cliquez sur le bouton Action pour visualiser le chemin de l'impulsion lumineuse.)





$d$  est la distance émetteur - miroir de l'horloge.

$v T'$  est la distance parcourue par l'émetteur entre un aller - retour.  $T'$  est le temps de cet aller - retour pour l'observateur immobile.




A l'aide de ces données et du Théorème de Pythagore :


 montrer que la distance parcourue est :  $2\sqrt{d^2 + \left(\frac{vT'}{2}\right)^2}$

  $c$  étant la vitesse de la lumière, montrer que  $cT' = 2\sqrt{d^2 + \left(\frac{vT'}{2}\right)^2}$

$c$  étant la même quelque soit le repère galiléen, on a également dans le repère de l'observateur immobile :



$$2d = cT$$

 En déduire :  $T' = \frac{T}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

 Une application numérique simple :  
 $v = 0,85 c$  alors  $v^2/c^2 = 0,72 \approx 3/4$  et  $1 - v^2/c^2 = 1/4$  soit  $T' = 2T$

Lorsque l'horloge mobile fait un aller-retour ( $T=1$ ), celle de l'observateur fixe en fait 2 ( $T' = 2$ ).  
L'horloge mobile est ralentie par rapport à celle de l'observateur fixe, c'est la **dilatation des durées**.

La réciproque est vraie. Pour l'observateur "mobile", l'observateur "fixe" se déplace avec la vitesse  $-v$  et le fait de changer  $v$  en  $-v$  dans la relation précédente ne change rien au résultat numérique. Les deux observateurs fixes chacun dans son propre référentiel observent un ralentissement de l'horloge de l'observateur en mouvement.

Faire d'autres applications numériques à l'aide du fichier Excel  ci-joint ou si vous n'avez pas Excel du fichier html .

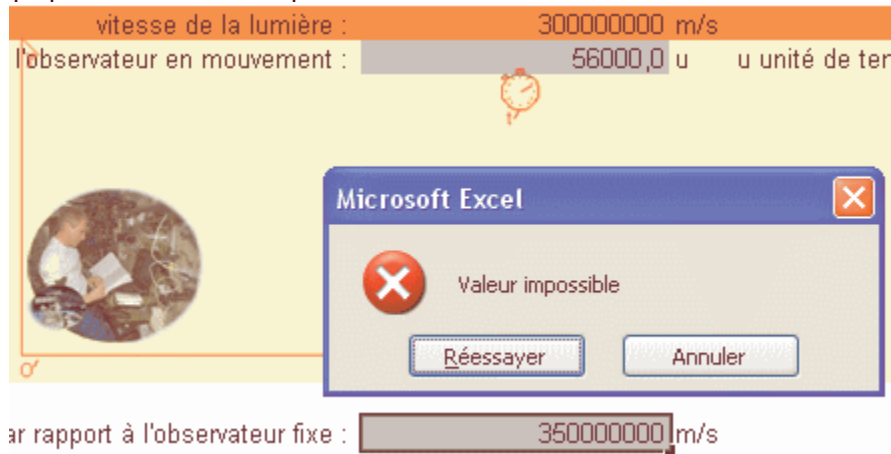
 Compléter le tableau ci-dessous :

T' (observateur mobile)	v vitesse de l'observateur mobile	T (observateur fixe)
1000	30000	
1000	250000000	
1000	280000000	
1000	-2,8E8	
1000		1001,00
1000		2000
2000		3000
3600	300 ( <i>vitesse du son</i> )	
3600	600 ( <i>avion supersonique Mach2</i> )	
3600	30 ( <i>automobile</i> )	

 Dans ce tableau, pour quelle valeur  $v$  de la vitesse de l'observateur la durée est-elle dilatée de seulement 1/1000 de sa valeur initiale?

 Pourquoi peut on dire que selon les 3 dernières lignes du tableau "l'heure, c'est l'heure"?

 Expliquer l'erreur affichée par Excel :



vitesse de la lumière : 300000000 m/s

l'observateur en mouvement : 56000,0 u u unité de ter

Microsoft Excel

Valeur impossible

Réessayer Annuler

par rapport à l'observateur fixe : 350000000 m/s

#### 4) Le temps du GPS :



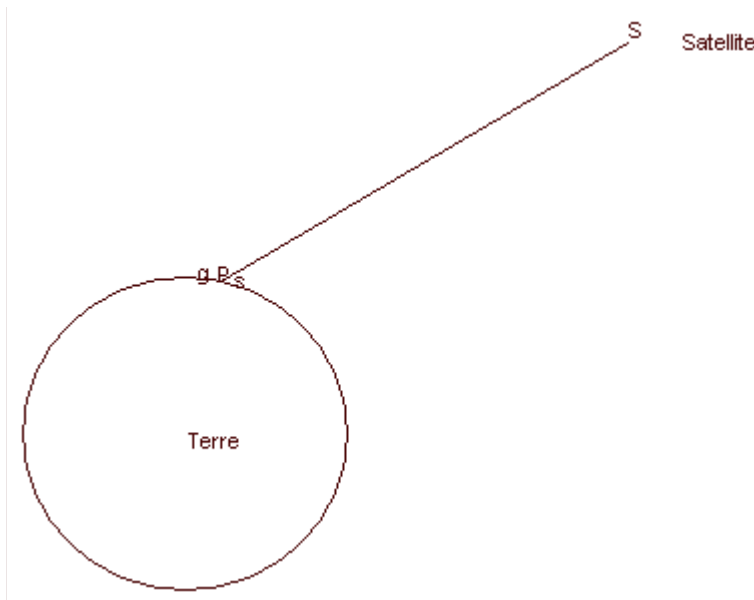
Le fonctionnement du GPS est basé sur la détection de satellites placés en orbite à une altitude de 20 000 km et qui ont une vitesse orbitale de 14 000 km/h soit 3900 m/s environ et leur période est de 12h.

On est loin de la vitesse de la lumière et pourtant...

Par rapport, à une horloge identique, située sur Terre, l'horloge du GPS retarde d'environ 8  $\mu$ s par jour. C'est un effet de la relativité restreinte.

 Retrouver ce résultat par le calcul.

#### Le principe de la localisation :



Le satellite envoie un signal électromagnétique, se propageant à la vitesse de la lumière, daté  $t_0$  (de l'horloge atomique du satellite) qui est reçu à la date  $t_1$  par le GPS. Le GPS détermine sa position par rapport au satellite :

$$PS = c(t_1 - t_0)$$

Tout va bien si l'horloge du satellite ne retarde pas.

#### L'erreur sur la position :

Si l'horloge retarde de 8  $\mu$ s, l'**erreur** sur la distance PS est de :  $8 \cdot 10^{-6} \times 3 \cdot 10^8$  soit 2400m ou **2,4 km**. Inacceptable pour un GPS.

Les méthodes de calcul, par le GPS, de positionnement des points à la surface de la Terre corrigent les dérives relativiste des horloges embarquées. Retard pour la relativité restreinte ou avance pour la relativité générale mais ceci est une autre histoire...

*Matériel : ordinateur avec Internet Explorer (ou FireFox), logiciel Excel 2003 (ou postérieur), GPS, casque ou haut-parleur*