

CHAPITRE 11 : TEMPS ET RELATIVITE RESTREINTE

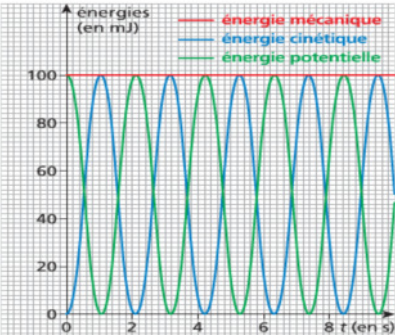
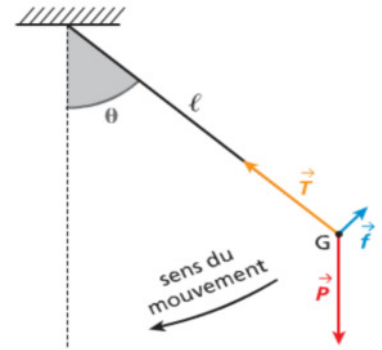
I. Oscillateurs et mesure du temps

1. Le pendule simple

Un pendule pesant (ou pendule simple) est un objet ponctuel G de masse **m** accroché à un fil sans masse et inextensible de longueur **l**.

A l'équilibre, le fil est vertical ; la position de G en mouvement est repérée par l'écart angulaire θ entre le fil et sa position d'équilibre.

L'objet est soumis à son poids **P**, à la force de rappel **T** et aux frottements de l'air **f**. La force de frottements est perpendiculaire à la direction du mouvement : elle ne travaille pas.



Si les frottements peuvent être négligés, l'énergie mécanique du pendule est constante au cours du temps :

$$E_m = E_c + E_{pp} = \text{cste}$$

L'énergie cinétique se transforme en énergie potentielle de

pesanteur, et réciproquement, au cours du mouvement.

Période des oscillations d'un pendule simple : Pour de petites oscillations, la

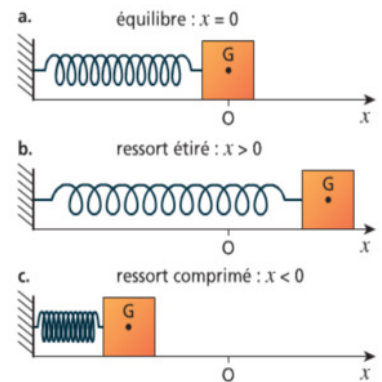
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

période **T** d'un pendule simple de longueur **l** est :

2. Le pendule élastique

Un pendule élastique est composé d'un objet de masse **m** accroché à l'extrémité d'un ressort de constante de raideur **k**. A l'équilibre, le ressort n'est ni allongé, ni étiré. La position est repéré par **x**.

Et dans un domaine restreint d'allongement, la force **F** exercée par un ressort sur l'opérateur est proportionnelle à l'allongement du ressort **x** : $F = k \cdot x$ où **k** est la constante de raideur du ressort en $N \cdot m^{-1}$.



Du fait de l'allongement ou de la compression du ressort, le système emmagasine de l'énergie potentielle élastique d'expression : $E_{pe} = \frac{1}{2} k \cdot x^2$

Période des oscillations d'un pendule élastique : La période **T** d'un pendule élastique comportant un solide de masse **m** accroché à un ressort de raideur **k** est :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

3. Dissipation d'énergie et transferts énergétiques

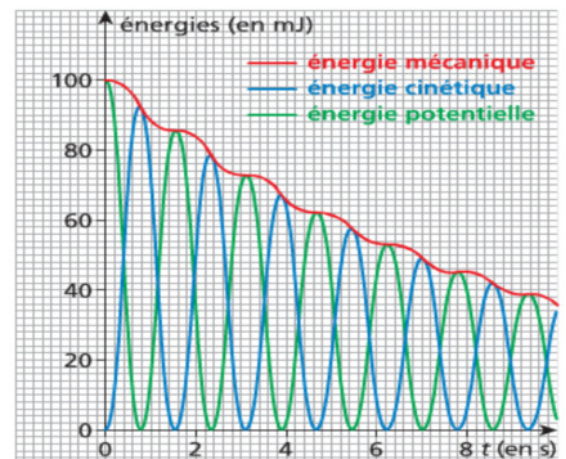
Même lorsque les **frottements** (fluides ou solides) sont très faibles, ils entraînent un amortissement des oscillations du pendule au bout d'un temps assez long.

Les oscillations s'accompagnent donc d'une dissipation d'énergie, c-à-d d'une diminution progressive de l' E_m (par transfert thermique entraînant l'échauffement du milieu).

L'évolution des E_c , E_p et E_m au cours du temps ont alors les allures caractéristiques ci-contre. Il est alors possible de déterminer le travail des forces de frottements entre deux dates : il est égal à la variation de l' E_m .

Si tous les **frottements** peuvent être **négligés**, l'énergie **mécanique** du pendule = **constante**.

On voit que l'énergie cinétique se transforme en énergie potentielle, et réciproquement.



II. Définition et mesure du temps

La période des oscillateurs sert de référence de durée : mesurer le temps revient à compter un nombre d'oscillations de période connue.

1. Evolution de la mesure de la seconde

Les phénomènes astronomiques périodiques servent de référence à la mesure du jour et de l'année depuis la Préhistoire. Pour mesurer des durées plus petites, les dispositifs mécaniques perfectionnés à partir du XVII^{ème} siècle utilisent des oscillateurs mécaniques (horloges mécaniques, horloges à quartz, ..).

Mais la variabilité des périodes d'oscillations en fonction des conditions rendent l'utilisation de tels dispositifs incompatible avec un besoin de grande précision.

2. Définition actuelle de la seconde : les horloges atomiques

Un atome peut subir une transition vers un niveau d'énergie supérieure lorsqu'il reçoit un photon (Absorption). Il faut pour cela que la fréquence ν de la radiation associée corresponde exactement à une transition énergétique ΔE possible de cet atome (n parle de quantification de l'énergie), telle que $\Delta E = h \nu$, où $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s est la constante de Planck.

La seconde est actuellement définie comme la durée d'exactly **9 192 631 770 périodes** de la radiation correspondant à la **transition entre 2 niveaux particuliers** de l'atome de ^{133}Cs .

III. Les postulats d'Einstein

Le principe de relativité stipule que les **lois physiques sont identiques dans tous les référentiels galiléens**

1. Invariance de la vitesse de la lumière

Jusqu'au XX^{ème} siècle, pour calculer la vitesse d'un objet dans un référentiel \mathcal{R}' autre que celui de l'observateur \mathcal{R} on ajoutait la vitesse de l'objet dans ce référentiel \mathcal{R}' à la vitesse du référentiel \mathcal{R}' par rapport au référentiel \mathcal{R} . Mais cette loi a été réfutée par de nombreuses expériences pour la lumière (Arago, Michelson et Morley ou d'Alvager). En effet :

Principe d'invariance de c : La vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels galiléens, $c = 3,00 \cdot 10^8$ m.s⁻¹ (valeur exacte : 299 792 458 m.s⁻¹).

Ce postulat semble difficile à admettre car la célérité de nombreuses ondes varie selon le référentiel d'étude. Par exemple, la vitesse des vagues à la surface de l'océan est nulle pour le surfeur qui se déplace sur elles, alors qu'elle ne l'est pas pour un observateur sur la plage.

Plusieurs expériences ont confirmées cela : celle de Michelson-Morley (1887) mesure les vitesses de propagation de la lumière dans différentes directions et obtient les même valeurs.

2. Dilatation du temps

Dans la théorie de la relativité, un événement est défini par un point unique dans l'espace et un instant unique.

Mais **le temps n'est pas absolu : deux événements simultanés dans un référentiel ne le sont pas dans un autre référentiel en mouvement par rapport au premier** (paradoxe des jumeaux). Tout référentiel doit donc être associé à une horloge qui lui est propre.

L'expérience de pensée suivante illustre pourquoi un même événement ne se produit pas à la même date dans tous les référentiels : Un vaisseau spatial se déplace en mouvement rectiligne et uniforme par rapport à la Terre. Le référentiel terrestre et celui du vaisseau sont considérés comme galiléens. A un instant donné, un flash est émis en O, centre du vaisseau. Deux

capteurs A et B, situés en tête et en queue de vaisseau, à la même distance de O, reçoivent ce signal lumineux (**Fig. 1**).

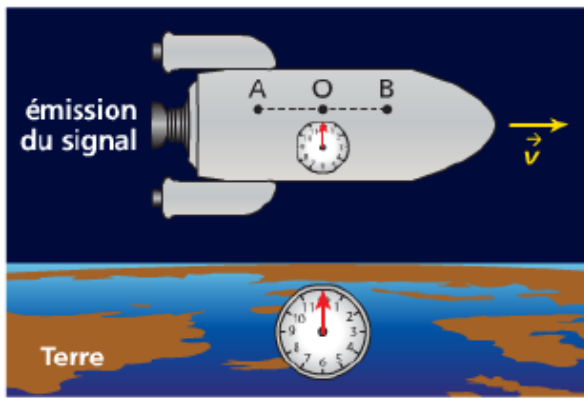


Figure 1



Figure 2



Figure 3

Dans le **référentiel du vaisseau**, les deux événements « **A reçoit le flash** » et « **B reçoit le flash** » sont **simultanés** puisque les distances à parcourir par le signal lumineux pour arriver en A ou en B sont les mêmes (**Fig. 2**).

Dans le **référentiel terrestre**, le capteur **A se rapproche du point d'émission du flash**, alors que le capteur B s'en éloigne. Comme la vitesse de la lumière est également c dans ce référentiel, **A reçoit le signal avant B** : les deux événements ne sont donc pas simultanés dans ce référentiel (**Fig. 3**).

a. Temps propre

La date à laquelle un événement un lieu dépend du référentiel ; la durée entre deux événements en dépend aussi.

Une durée propre est un intervalle de temps entre deux événements se produisant au même lieu de l'espace. Cette durée est **mesurée avec l'horloge associée au référentiel propre** des événements pour lequel ils ont lieu à un endroit fixe.

Par opposition, la durée entre deux événements se produisant en des lieux différents de l'espace est mesurée par une horloge associée au référentiel en mouvement par rapport au référentiel propre. Ce n'est pas un intervalle de temps propre : on le nomme «**durée mesurée**» ou encore « durée impropre ».

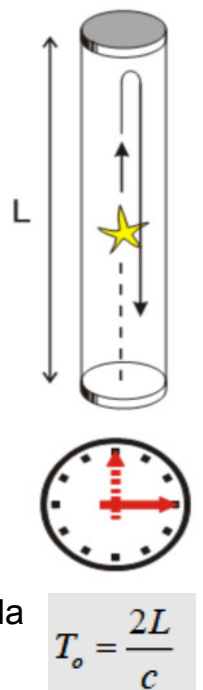
b. Application

L'expérience de pensée suivante permet de déterminer la relation entre durée propre et durée mesurée. On considère une « horloge à lumière » où une impulsion lumineuse effectue des va-et-vient dans un tube entre deux miroirs parallèles distants d'une longueur L . Un mécanisme compte le nombre d'allers et retours comme dans les horloges mécaniques normales.

Embarquons cette horloge dans un vaisseau en mouvement rectiligne uniforme de vitesse v par rapport à la Terre, et supposons que cette vitesse soit perpendiculaire au tube de l'horloge.

Mesurons l'intervalle de temps entre les événements « le signal part du miroir inférieur » et « le signal est reçu par le miroir inférieur ».

Dans le référentiel des astronautes, la distance $2L$ est parcourue à la vitesse de la lumière c pendant la durée propre T_0 , et :



$$T_0 = \frac{2L}{c}$$

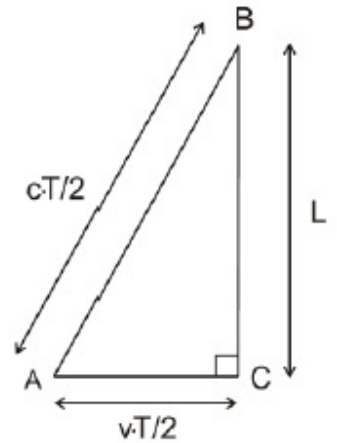
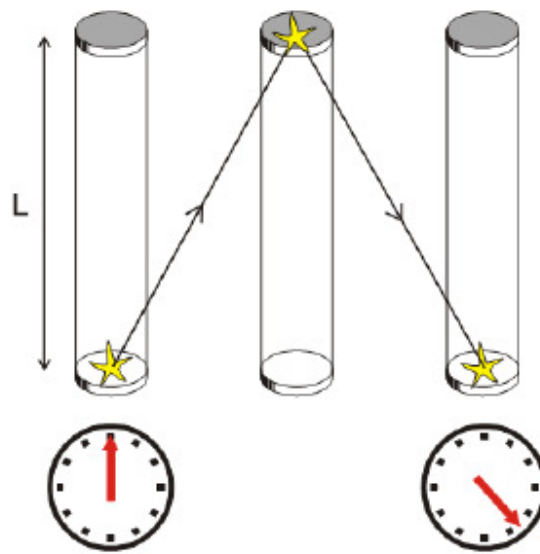
Pour nous terriens, l'horloge est en mouvement uniforme de vitesse v et le signal parcourt une distance plus longue. Toutefois, d'après le postulat d'Einstein, la vitesse du signal lumineux reste égale à c : le signal met un temps $T/2$ supérieur à $T_0/2$ pour parcourir la distance L entre les deux miroirs.

Le théorème de Pythagore appliqué au triangle rectangle (ABC) permet d'écrire

$$\left(c \frac{T}{2}\right)^2 = \left(v \frac{T}{2}\right)^2 + L^2$$

Comme $L = c \frac{T_0}{2}$, il vient

$$\left(c \frac{T}{2}\right)^2 = \left(v \frac{T}{2}\right)^2 + \left(c \frac{T_0}{2}\right)^2$$



En simplifiant par 2,

$$(cT)^2 = (vT)^2 + (cT_0)^2$$

On obtient finalement l'expression du temps T mesuré sur Terre en fonction de celui T_0 mesuré dans le référentiel des astronautes :

$$T = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} T_0 = \gamma \cdot T_0$$

où γ est appelé facteur de Lorentz.

Donc $T > T_0$.

Quand faut-il tenir compte de la dilatation du temps ?

L'écart entre T et T_0 n'est **significatif que pour des vitesses proches de c** . Ainsi, pour des vitesses inférieures à $c/10$ (situations courantes : TGV, avion,...), la dilatation des durées est négligeable.



Exemples :

- Le muon est une particule de la haute atmosphère qui se désintègre spontanément pour donner d'autres particules. La durée de vie (entre sa naissance et sa mort) peut donc être mesurée dans le référentiel propre « muon » \mathcal{R} et dans le référentiel terrestre \mathcal{R}' . Dans le référentiel \mathcal{R}' cette durée est plus grande si bien que l'on arrive à capter des muons à la surface de la Terre alors que si on considère cette durée dans le référentiel \mathcal{R} les muons n'arriveraient pas jusque-là. Cela est dû à la dilatation des durées.
- Les GPS donneraient des résultats faussés si la correction faite pour prendre en compte la dilatation des durées n'était pas faite.