

# MESURE DU TEMPS

## Evolution historique et Relativité

### 1/ MESURE DU TEMPS ET DÉFINITION DE LA SECONDE :

#### a – Evolution historique de la définition de la seconde : **DM 2**

La précision dans la mesure du temps a toujours été essentielle pour rythmer la vie sociale et religieuse, pour répondre aux besoins de la navigation maritime, du commerce et des sciences du mouvement. D'abord basée sur les mouvements astronomiques périodiques, la mesure du temps est révolutionnée au XVIII<sup>ème</sup> siècle par le physicien hollandais Christiaan HUYGENS qui utilise pour la première fois un oscillateur (le pendule). La mesure deviendra plus précise encore avec l'utilisation du quartz (XX<sup>ème</sup> siècle) et surtout aujourd'hui avec l'horloge atomique (incertitude relative inférieure à  $10^{-16}$ ).

Cette augmentation de la précision de la mesure du temps a entraîné une évolution de la définition de la seconde. S'appuyant d'abord sur des mouvements périodiques astronomiques, elle se définit aujourd'hui de manière atomique grâce à la précision et la stabilité des horloges atomiques :

**La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre deux niveaux d'énergie de l'atome de césium 133.**

Le **temps atomique** est l'échelle de temps la plus précise jamais réalisée. Il est établi en faisant la moyenne des informations provenant de plusieurs centaines d'horloges atomiques réparties en différents endroits du globe. Le temps légal utilisé dans tous les pays (nommé UTC : temps universel coordonné) découle du temps atomique.

#### b – Exemple de mesure du temps avec un oscillateur mécanique :

#### Activité 7.1

De nombreux dispositifs de mesure du temps utilisent des oscillateurs mécaniques qui évoluent de façon périodique autour de leur position d'équilibre.

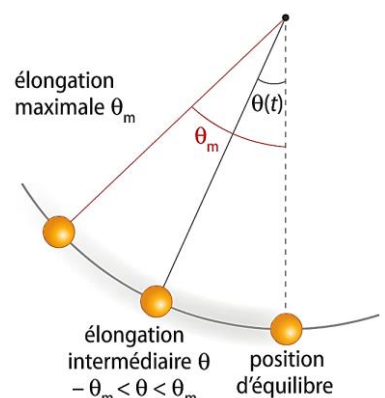
Leur période sert de référence de durée : mesurer le temps revient à compter un nombre d'oscillations de période connue.

##### Exemple du pendule simple :

Si l'amplitude des oscillations est suffisamment faible ( $\theta_m < 20^\circ$ ), la période  $T$  d'un pendule simple ne dépend que de sa longueur  $L$  et de la valeur du champ de pesanteur local  $g$  :  $T = 2\pi\sqrt{L/g}$

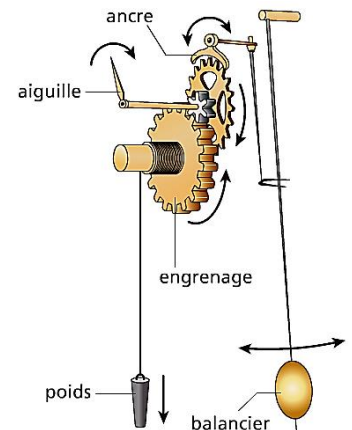
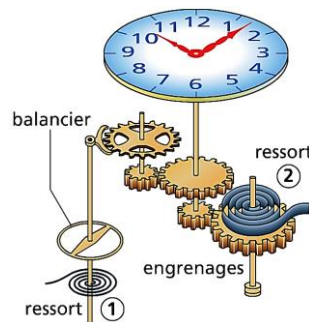
Il est ainsi possible de fabriquer une horloge qui bat la seconde en choisissant la valeur de  $L$  adéquat.

Avec une telle horloge, il faut ajuster la valeur de  $L$  en fonction du lieu où l'on se trouve (variation de  $g$ ) et de la température (dilatation/contraction du pendule).



**Le pendule simple**

Les oscillateurs mécaniques sont soumis à des forces de frottement qui dissipent leur énergie mécanique au cours du temps. Pour éviter une diminution de l'amplitude des oscillations, il est nécessaire de compenser les pertes d'énergie grâce à des ressorts tendus ou des masses en suspension. Exemples :



### c – présentation d'une mesure avec son incertitude :

AP3

En sciences expérimentales, il n'existe pas de mesures exactes. Les mesures sont entachées d'erreurs plus ou moins importantes en fonction de la qualité des instruments et de l'habileté du manipulateur. La mesure ne pouvant être absolument précise, il existe inexorablement un écart entre la valeur obtenue et la valeur exacte (appelée valeur vraie). Cet écart est appelé erreur de mesure.

Lorsqu'on présente le résultat d'une mesure, il faut donc indiquer la valeur de la grandeur mesurée avec son unité, mais aussi préciser l'incertitude de la mesure pour informer sur sa précision.

➤ Présentation du résultat d'une mesure :  $M = (m \pm U_m) \text{ unité}$

**M** : grandeur mesurée (ex : vitesse, température, masse . . .)

**m** : valeur de la mesure (exprimée préférentiellement avec l'écriture scientifique)

**U<sub>m</sub>** : incertitude de la mesure (arrondie à la valeur supérieure avec un seul chiffre significatif)

(le dernier chiffre significatif de **m** étant incertain, il doit être situé à la même position décimale que celui de **U<sub>m</sub>**)

➤ La qualité de la mesure s'évalue grâce à son **incertitude relative** :

$$\frac{U_m}{m}$$

Elle est d'autant meilleure que l'incertitude **U<sub>m</sub>** est petite par rapport à la valeur **m** de la mesure.

Lorsqu'un même opérateur répète plusieurs fois le mesurage de la même grandeur **M** dans les mêmes conditions expérimentales, il peut trouver des résultats différents. Dans ce cas, la meilleure valeur à retenir pour la grandeur mesurée est la valeur moyenne  $\bar{m}$  des mesures effectuées. L'incertitude **U<sub>m</sub>** (appelée dans ce cas « incertitude de répétabilité ») est liée à l'écart-type  $\sigma$  de la série de mesures et au nombre **n** de mesures effectuées (la répétition des mesures améliore la précision). Pour avoir au moins 95% de chance de trouver la valeur vraie à l'intérieur de l'intervalle de confiance  $[m - U_m ; m + U_m]$ , on choisit généralement  $U_m = 2\sigma/\sqrt{n}$ .

## 2/ LA RELATIVITÉ DU TEMPS :

### a – Postulat d'Einstein : invariance de la vitesse de la lumière

### Activité 7.2

Fin XIX<sup>ème</sup> siècle, les physiciens pensaient connaître toutes les lois permettant de comprendre le comportement de la matière. Les expériences de plus en plus précises sur la lumière posaient cependant problème : toutes les mesures confirmaient que la vitesse de la lumière est la même quel que soit le référentiel par rapport auquel on la mesure, ce qui contredisait la loi de composition des vitesses énoncée par Galilée.

Pour résoudre ce problème, le physicien allemand Albert Einstein (1879-1955) proposa d'abandonner la conception newtonienne de temps absolu en considérant que la mesure du temps dépend du référentiel de mesure.

Dans un article publié en 1905, il énonce deux postulats qui serviront de base à sa théorie de la relativité restreinte :

#### Postulats d'Einstein :

- les lois de la physique sont identiques dans tous les référentiels galiléens
- la vitesse de la lumière dans le vide est la même ( $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$ ) dans tous les référentiels galiléens



Conséquence : L'intervalle de temps entre deux événements\* mesurés dans deux référentiels différents n'est pas le même : la durée d'un phénomène dépend du référentiel par rapport auquel on l'étudie.

(\* ) fait se produisant en un point de l'espace à un instant donné (ex : émission d'un éclair)

### b – Dilatation des durées :

La durée entre deux événements dépend du référentiel dans lequel on la mesure. On distingue deux définitions :

- la **durée propre**  $\Delta t_{\text{propre}}$  est la durée mesurée dans un référentiel galiléen où les deux événements ont lieu au même endroit (on suppose que l'horloge est fixe dans le référentiel propre)
- la **durée impropre**  $\Delta t_{\text{impropre}}$  est la durée mesurée dans un référentiel galiléen autre que le référentiel propre

Par un effet cinématique, la durée impropre est toujours plus longue que la durée propre (c'est le phénomène de dilatation des durées) :

$$\Delta t_{\text{impropre}} = \gamma \cdot \Delta t_{\text{propre}}$$

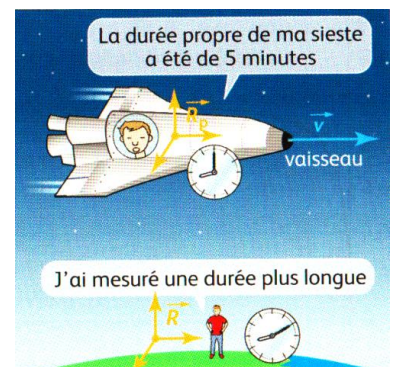
$$\text{avec } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$\Delta t_{\text{impropre}}$  et  $\Delta t_{\text{propre}}$  s'expriment en seconde

$\gamma$  : coefficient de dilatation (sans unité)

$v$  : vitesse relative entre les référentiels propre et impropre ( $\text{m.s}^{-1}$ )

$c$  : célérité de la lumière de dans le vide

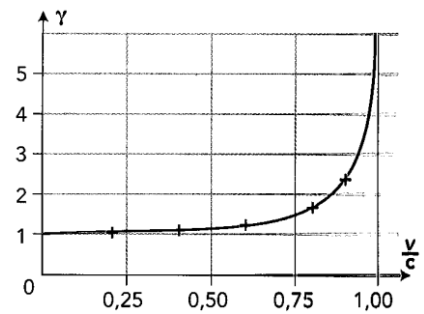


## c – Domaines d'application de la relativité :

### Activité 7.3

Si la valeur de la vitesse relative  $v$  entre les deux référentiels propre et impropre est faible par rapport à la célérité  $c$  de la lumière dans le vide, la dilatation des durée n'est plus perceptible :

- dans ce cas, on retrouve la loi composition des vitesses de la mécanique classique
- la vitesse  $v$  à partir de laquelle le phénomène de dilatation n'est plus perceptible dépend de la précision de l'horloge  
(les horloges atomiques peuvent détecter des différences de quelques picoseconde ( $10^{-12}$ s) )



Les lois de la relativité s'applique donc dans deux configurations expérimentales principales :

- lorsque la vitesse d'un objet est très voisine de  $c$  (cas des particules d'origine cosmiques ou dans des accélérateurs)
- lorsque des horloges atomiques très précises sont utilisées (cas des GPS, navettes spatiales, satellites)

**EXERCICES :** Lire « préparer le Bac » p230/231 puis n°14,16,17,20,24,25,28 p226/229