

Partie Comprendre : Lois et modèles

CHAP 08-ACT DOC Temps et relativité restreinte

Objectifs :

- Extraire et exploiter des informations relatives à l'évolution de la mesure du temps et de la définition de la seconde.
- Extraire et exploiter des informations sur l'influence des phénomènes dissipatifs sur la problématique de la mesure du temps et la définition de la seconde.
- Extraire et exploiter des informations pour justifier l'utilisation des horloges atomiques dans la mesure du temps.
- Comprendre un test expérimental de l'invariance de la vitesse de la lumière
- Extraire et exploiter des informations relatives à une situation concrète où le caractère relatif du temps est à prendre en compte

1. MESURE DU TEMPS ET DEFINITION DE LA SECONDE LA QUETE DE LA PRECISION

1.1. Documents

La seconde est un étalon de mesure du temps. C'est une grandeur de référence qui doit être précise, reproductible, donc immuable. Pendant longtemps, elle a été définie à partir du jour solaire moyen, mais les découvertes scientifiques et les innovations techniques ont conduit à en donner une nouvelle définition. Dans quel but la définition de la seconde a-t-elle évolué? Quels avantages présente l'utilisation des horloges atomiques dans la mesure du temps?

■ La mesure du temps

Depuis l'Antiquité, les hommes ont toujours cherché à mesurer le temps ou, plus précisément, les intervalles de temps. Ils se sont d'abord tournés vers les phénomènes naturels qui présentent une grande régularité comme la rotation de la Terre autour du Soleil, la rotation de la Lune autour de la Terre ou encore la rotation de la Lune sur elle-même pour définir des calendriers et des échelles de temps. Ils ont ensuite

cherché à réaliser eux-mêmes des instruments toujours plus précis et l'un des plus anciens instruments est connu sous le nom de sablier égyptien. Cependant, il faudra attendre le début des années 1600 et la découverte du pendule par GALILÉE et sa mise en pratique par HUYGENS pour que ces instruments commencent à atteindre une précision de l'ordre de quelques dizaines de secondes par jour.

Extrait de C. SALOMON, XV séminaire Poincaré, « Le Temps »

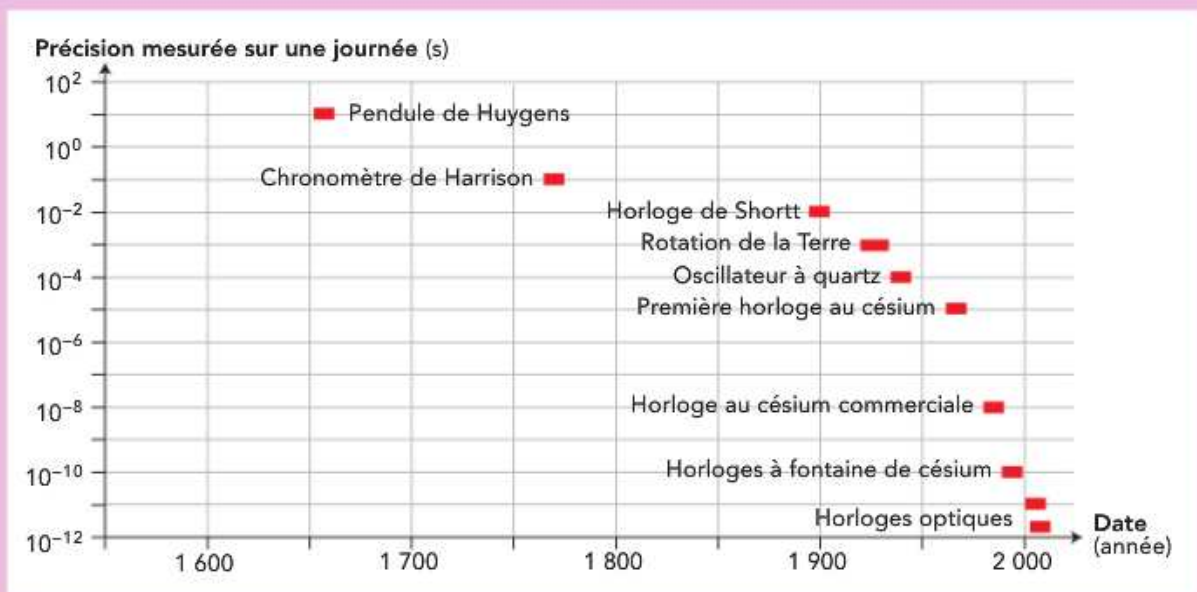
Pourquoi le césium 133?

Le césium a plusieurs caractéristiques qui justifient son utilisation :

- le césium est un atome stable et simple à manipuler;
- à l'état naturel, il n'existe qu'un seul isotope du césium. La fréquence du rayonnement échangé entre les deux niveaux particuliers est donc la même pour tous les atomes;
- cette fréquence est grande (10^{10} oscillations par seconde), ce qui permet d'avoir une horloge d'une grande précision.

Depuis 1967, la définition de la seconde est basée sur une transition de l'atome de césium 133.

■ Des horloges de plus en plus précises



Évolution de la précision de la mesure du temps au cours des années (source : C. SALOMON).

La définition de la seconde a évolué au cours du temps. Avec l'avènement des mesures astronomiques, les astronomes se sont aperçus que la rotation de la Terre autour de son axe n'était pas uniforme. Sa vitesse diminue sensiblement et, de fait, la durée des jours augmente.

Ce ralentissement est principalement généré par l'effet des marées. Sous l'action des forces exercées essentiellement par la Lune, la Terre se déforme.

Il apparaît des bourrelets océaniques créant des frottements qui ralentissent sa rotation. Dans les années 1960, la définition de la seconde comme étant $1/86\,400^{\text{e}}$ du jour solaire moyen est donc abandonnée.

Aujourd'hui, la seconde est définie comme la durée nécessaire pour qu'il se produise 9 192 631 770 oscillations au sein de l'atome de césium 133.

On parle de temps atomique.

■ L'horloge atomique, pourquoi et comment ?

Pourquoi des horloges atomiques ?

Les horloges atomiques permettent d'obtenir un oscillateur stable de très courte période, sans perte d'énergie, ce qui améliore grandement la précision de la mesure du temps.

Comment ça marche ?

Un atome peut exister sous différents niveaux d'énergie. Ces énergies ne peuvent prendre que des valeurs bien précises, caractéristiques de la nature de l'atome. Pour passer d'un niveau d'énergie à un autre, l'atome reçoit ou émet un photon dont l'énergie correspond exactement à la différence d'énergie entre les deux niveaux.

Puisque les différences d'énergie entre les états d'un atome ont des valeurs parfaitement définies, il en est de même de la fréquence, donc de la période de l'onde électromagnétique associée au changement de niveau. Une horloge atomique utilise la période de cette onde électromagnétique.

Le signal utile d'une horloge atomique est le signal délivré par un oscillateur macroscopique à quartz, contraint d'osciller à la fréquence du rayonnement échangé par l'atome de césium 133 lors d'une transition électronique entre deux niveaux d'énergie particuliers. Cette fréquence vaut 9 192 631 770 Hz.

On utilise donc des atomes de césium qui contrôlent et ajustent la fréquence générée par le quartz.

Le quartz, un matériau piézoélectrique

Le quartz est un minéral composé de dioxyde de silicium de formule SiO_2 (silice). Il est piézoélectrique, c'est-à-dire qu'il vibre avec une fréquence stable lorsqu'il est stimulé électriquement. Inversement, s'il est mis en oscillation mécanique, il émet un signal électrique, stable également, de la même fréquence.



■ Quel avenir pour les horloges atomiques ?

Aujourd'hui, les horloges atomiques ont de nombreuses applications : elles permettent par exemple de déterminer l'heure légale de chaque fuseau horaire ou de faire fonctionner le système de positionnement GPS (voir **chapitre 8**).

Les horloges les plus récentes ont des fréquences encore plus élevées (10^{15} Hz). Elles sont devenues meilleures que les horloges au césium et il faudra, à l'avenir, changer la définition de la seconde.

1.2 Questions

- a) Donner des exemples de phénomènes physiques utilisés pour définir une mesure du temps.
- b) Quel est le paramètre commun à tous ces phénomènes physiques?
- c) Pourquoi parle-t-on de jour solaire moyen?
- d) On peut parler de phénomènes dissipatifs responsables du ralentissement de la rotation de la Terre,
- d1) Quels sont les phénomènes dissipatifs évoqués dans les documents ci-dessus?
 - d2) Pourquoi sont-ils qualifiés de « dissipatifs »?
 - d3) En quoi ces phénomènes sont-ils un frein à l'utilisation des systèmes mécaniques pour mesurer le temps?
- e) Justifier l'utilisation des horloges atomiques pour la définition de la seconde.

2. L'EXPERIENCE DE MICHELSON ET MORLEY

2.1. Documents

Jusqu'à la fin du XIXe siècle, la lumière était supposée se propager dans un milieu appelé éther, par analogie avec les ondes mécaniques qui font vibrer un milieu matériel à leur passage.

La célérité de la lumière dans le référentiel terrestre devait donc être différente de sa célérité dans le référentiel de l'éther.

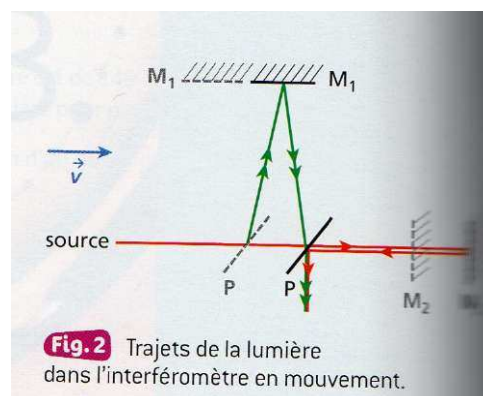
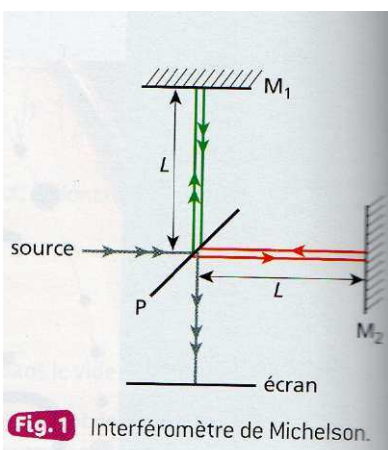
Pour vérifier cela, les physiciens américains Albert Michelson (1852-1931) et Edward Morley (1838-1923) étudièrent les variations de la vitesse de la lumière à l'aide d'un appareil utilisant les interférences lumineuses d'une source de longueur d'onde λ . L'interféromètre de Michelson est constitué d'une lame semi-réfléchissante séparant le faisceau en deux, et de deux miroirs M_1 et M_2 placés à égale distance L de la lame (Fig. 1). Les deux faisceaux réfléchis sont recombinaés par la lame semi-réfléchissante et leur figure d'interférence est observée sur un écran. En supposant l'interféromètre en mouvement à la vitesse v constante (de valeur 30 km.s^{-1}) dans le référentiel de l'éther, la lumière parcourt, sur un trajet, la distance

$$L_1 = \frac{2.L}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

et, sur l'autre, la distance

$$L_2 = \frac{2.L}{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

(Fig. 2).



2.2. Questions

a) Quelle serait la différence de marche au centre de l'écran (correspondant aux rayons en incidence normale sur les miroirs) si l'interféromètre était immobile dans le référentiel de l'éther ?

- Le centre de l'écran serait-il sombre ou lumineux ?

b) Répondre aux mêmes questions en considérant cette fois la différence de marche $\delta = L_2 - L_1$.

- L'intensité lumineuse au centre de l'écran est-elle maximale ?

c) L'expérience de Michelson et Morley, réalisée entre 1881 et 1887 et reproduite de nombreuses fois depuis, n'a jamais montré de différence dans la figure d'interférences entre les deux situations. Ceci permet d'émettre plusieurs hypothèses :

- la mesure n'est pas assez précise,
- le référentiel terrestre est immobile par rapport à l'éther,
- la célérité de la lumière est c dans l'éther et dans le référentiel terrestre.

Sachant que les physiciens sont capables de mesurer des distances très inférieures à la longueur d'onde, quelle hypothèse semble vraisemblable ?

d) Montrer alors à l'aide de la Figure 1, que la différence de marche est bien nulle si la vitesse de la lumière est égale à c dans tous les référentiels.

3. EFFET RELATIVISTE POUR LE GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS)

3.1. Documents

La vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tout référentiel. Il n'y a donc pas de référentiel absolu, ni de temps absolu : le temps dépend du référentiel considéré.

Considérons, par exemple, un satellite tournant autour de la Terre à la vitesse v dans le référentiel terrestre.

Si une horloge située à bord mesure une durée T_0 dans le référentiel du satellite, la durée T correspondante dans le référentiel terrestre est :

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

La différence est négligeable pour la plupart des phénomènes de la vie courante, sauf si la précision recherchée est très grande.

Le système GPS nécessite une précision extrême. Il fonctionne grâce à plusieurs satellites dont la vitesse dans le référentiel terrestre est de $v = 3\,870 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

La célérité de la lumière dans le vide est $c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

3.2. Documents

a) Expliquer pourquoi le phénomène est appelé dilatation du temps.

b) L'horloge embarquée du satellite mesure une durée T_0 égale à une seconde exactement.

La durée correspondante mesurée sur la Terre est notée T .

Calculer la valeur de $T - T_0$ sans tenir compte des chiffres significatifs.

c) Quel serait l'écart de durée au bout d'un jour ?

d) Quel est l'écart de distance parcourue par la lumière au bout d'une seconde ?

Au bout d'une journée ?

Expliquer alors pourquoi les systèmes GPS sont équipés d'un système de correction d'horloges.

e) Les horloges des satellites GPS sont des horloges au césium. Une seconde est la durée de $9\,192\,631\,770$ périodes d'une radiation donnée du césium.

Montrer que la différence entre la seconde à bord du satellite et la durée correspondante sur Terre est significative avec une telle précision, ce qui justifie l'emploi de telles horloges.

f) En vous appuyant sur un exemple numérique, montrer que la dilatation du temps est négligeable dans la vie courante.

4. MODELISER LA DILATATION DU TEMPS

La modélisation mathématique de la dilatation du temps permet au physicien de définir le domaine d'influence de ce phénomène.

4.1. Principe

L'intervalle de temps entre deux événements se produisant en un même lieu s'appelle durée propre et se note Δt_p . Pour 1 observateur en mouvement uniforme de translation, ces deux événements ne se produisent plus en un même lieu.

La durée mesurée Δt_m entre ces deux événements est alors différente de leur durée propre Δt_p . C'est la conséquence directe du phénomène de dilatation du temps pour un observateur en mouvement.

Dans la vie courante, l'effet de cette dilatation n'est pas perceptible : en effet, pour des vitesses de déplacement habituelles, et en l'absence d'une volonté de précision extrême, l'écart entre les durées Δt_m et Δt_p est négligeable.

Les outils mathématiques dont dispose le physicien permettent de déterminer une relation simple entre la durée mesurée Δt_m et la durée propre Δt_p .

4.2. Mise en œuvre

Pour la situation d'étude, on considère le parcours de la lumière dans le cas d'un tir laser utilisé pour déterminer la distance Terre-Lune, tel qu'observé :

- Par une personne placée sur Terre d'une part (Fig. 2 a) ;
- Par une personne embarquée à bord d'une navette spatiale d'autre part (Fig. 2 b).

4.3. Exploitation

a) On se place dans le cas de l'observateur terrestre.

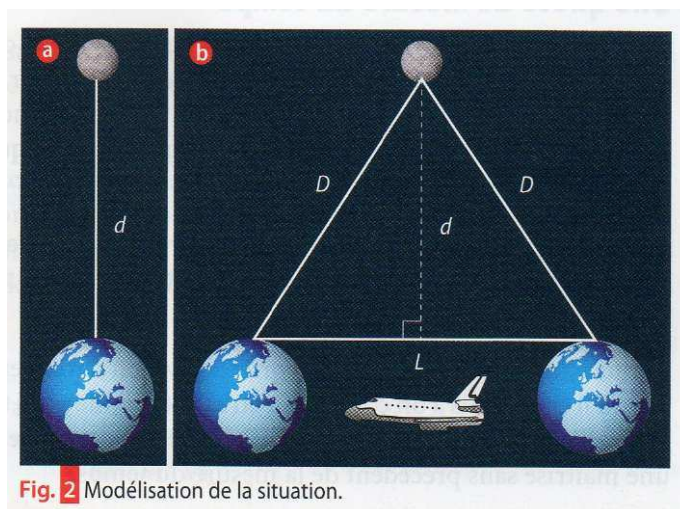
a1) Exprimer, en fonction de la distance d , la distance parcourue par la lumière laser pour effectuer un aller-retour Terre-Lune.

a2) En déduire l'expression de la durée propre Δt_p mise par le rayon laser pour effectuer l'aller-retour Terre-Lune, en fonction de la distance d et de la vitesse de la lumière c .

b) On se place maintenant dans le cas de l'observateur embarqué dans la navette spatiale, qui se déplace à une vitesse v .

b1) Donner l'expression de la durée mesurée Δt_m mise par la lumière laser pour effectuer l'aller-retour Terre-Lune en fonction de la distance D et de la vitesse de la lumière c .

b2) Exprimer la durée mesurée Δt_m en fonction de la distance L et de la vitesse v du vaisseau spatial.



c) En utilisant le théorème de Pythagore, établir une relation entre D, d et L

d) En déduire une relation entre Δt_p , Δt_m , c et v.

e) Montrer que la durée mesurée est reliée à la durée propre par la relation : $\Delta t_m = \gamma \cdot \Delta t_p$

où

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

γ est appelé « coefficient de Lorentz ».

f) En admettant que la vitesse de lumière dans le vide est une vitesse limite, mettre en évidence la dilatation des durées pour un observateur en mouvement.

g) À l'aide d'un tableur-grapheur ou d'une calculatrice, représenter l'évolution de γ en fonction de $\frac{v}{c}$.

h) Montrer que la dilatation du temps est :

- notable, dès que v atteint une vitesse de l'ordre du vingtième de celle de la lumière ;
- colossale, si v se rapproche de la vitesse de la lumière