

DOSSIER LA MESURE DU TEMPS



Objectif :

Extraire et exploiter des informations relatives à la mesure du temps pour justifier l'évolution de la définition de la seconde et l'utilisation des horloges atomiques

Le temps est une grandeur physique. De nos jours son unité légale est la seconde. Le temps est un phénomène périodique qui se reproduit identique à lui-même à intervalles de temps réguliers.

C'est dès la plus haute antiquité que l'homme a senti le besoin de mesurer le temps ; cela a toujours été une des préoccupations majeures de l'humanité dès qu'elle réussit à organiser des institutions religieuses, sociales et économiques. Au début, on mesurait le temps à l'aide des étoiles et des astres pour évaluer approximativement les différents moments de la journée. Depuis, l'Homme invente continuellement des moyens précis pour se situer dans le temps.

Afin d'assurer leur bonne marche, il était indispensable que l'écoulement du temps pût être déterminé et contrôlé. On établit alors des calendriers pour définir la succession des jours, des mois et des années, et l'on inventa des systèmes variés pour diviser le temps compris dans une journée c'est-à-dire entre le lever et le coucher du soleil.

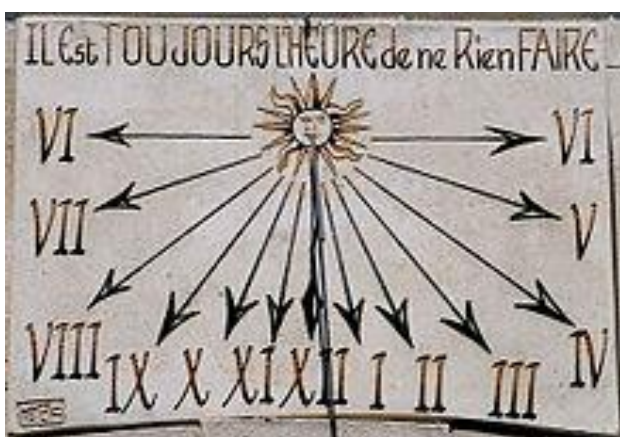
1. Evolution historique de la définition de la seconde

Trois définitions de la seconde se sont succédé, liées aux progrès des instruments de mesure du temps et à l'évolution des besoins en précision.

Date	Avant 1956	Entre 1956 et 1967	Depuis 1967
Définition	La seconde est égale à $1/86400$ du jour solaire terrestre moyen	La seconde est égale à $1/31556925,9747$ de l'année tropique 1900, c'est-à-dire la durée écoulée entre deux équinoxes de printemps en 1900	La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre deux niveaux de l'état fondamental de l'atome de césium 133
Commentaire	Le jour solaire fluctue, ce qui rend instable sa moyenne	Cette échelle, très stable, fut rapidement supplantée	Des horloges atomiques disséminées dans le monde entier donnent une référence universelle du temps

2. Les premiers instruments de mesure

Le cadran solaire



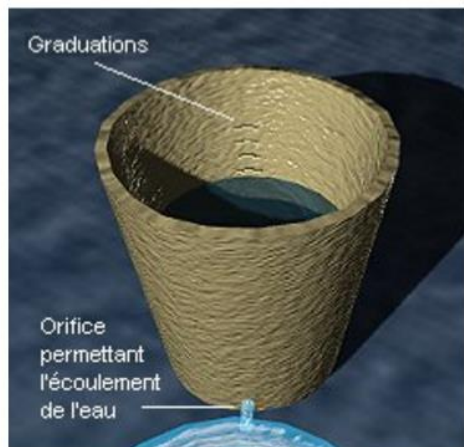
L'extrémité de l'ombre d'un bâton planté verticalement parcourt un arc : on fabrique un instrument formé d'une tige, et un cadran, horizontal ou vertical, sur lequel sont gravés des traits indiquant l'heure.

Le cadran solaire est considéré comme un des tout premiers objets utilisés par l'homme pour mesurer l'écoulement du temps. La première

« horloge », le gnomon, une sorte de cadran solaire rudimentaire, fut créée au III^{ème} millénaire avant J.C.

Le cadran solaire le plus ancien est égyptien et date de 1500 avant JC. Ce système est connu dans toutes les civilisations, mais il est imprécis.

La clepsydre



La forme évasée de la clepsydre permet un débit plus régulier de l'eau

Une clepsydre (étymologiquement, il s'agit d'une *voleuse d'eau*) inventé par le grec Ctésibios, est un récipient percé dont de l'eau s'écoule. À l'intérieur du récipient, des graduations permettent de mesurer des intervalles de temps, l'heure était indiquée par le niveau d'un flotteur.

Parties d'Égypte, en -1530 les clepsydres se sont répandues chez les Grecs à partir de la seconde moitié du Ve siècle avant J-C puis chez les Romains en 159 avant J-C. C'est le cadran solaire qui a été utilisé pour les graduer.

Ces horloges à eau furent les premiers réveils : elles étaient utilisées dans les monastères pour déclencher une sonnerie aux heures de prière. Les Grecs et les Romains l'utilisaient pour limiter le temps de parole dans les tribunaux ou pour limiter des horaires dans les règlements concernant les services publics.

Elle fut maintes fois perfectionnée jusqu'au XVIII^e siècle pour donner naissance à de véritables horloges à eau.

Le sablier



Le premier sablier apparaît vers l'an 1000, la légende raconte qu'ils ont été inventés afin de limiter le temps de parole des orateurs trop bavards.

Le sablier était peu pratique pour mesurer des longues durées car il fallait le retourner souvent, le bulbe rempli de sable qui était constitué de coquilles d'œufs pulvérisées (car utiliser du vrai sable était trop grossier), est placée en haut et par l'effet de la gravité, le sable s'écoule lentement et régulièrement dans l'autre. Une fois que tout le sable est dans le bulbe du bas, on peut retourner le sablier pour mesurer une autre période de temps

Il est fiable, précis et peu coûteux ; c'est l'instrument le plus répandu du XIV^e au XVIII^e siècle. Il est utilisé essentiellement pour des durées courtes (pour des fractions d'heures) dans la marine.

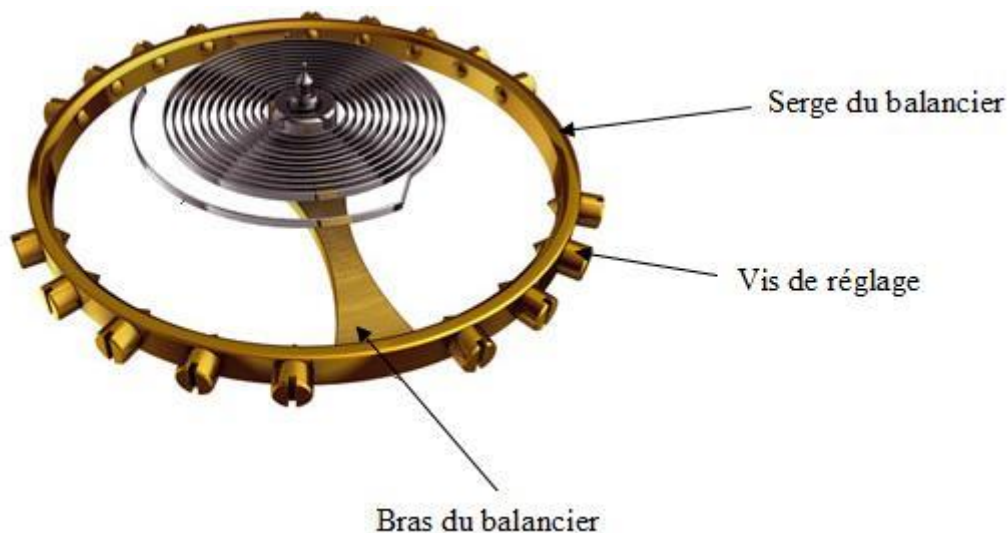
3. Les horloges mécaniques

Pour mesurer des durées plus petites, les dispositifs mécaniques perfectionnés à partir du XVII^e siècle utilisent des oscillateurs mécaniques :

- des pendules pesants (balanciers) pour les horloges mécaniques
- des systèmes masse-ressort dans les montres mécaniques
- un cristal oscillant dans les montres à quartz.

Mais les oscillateurs mécaniques sont soumis à la force des frottements, responsables de la dissipation de leur énergie mécanique au cours du temps, donc de la diminution de l'amplitude de leurs oscillations. Il faut donc entretenir ces oscillations par un apport d'énergie : il est nécessaire de prévoir un mécanisme d'entretien des oscillations qui fournit de l'énergie à l'oscillateur mécanique.

Les dissipations énergétiques que subit un pendule simple utilisé comme étalon de temps présentent un autre inconvénient : sa période T est légèrement différente de sa période propre T_0 . La variabilité des périodes d'oscillations en fonction des conditions atmosphériques ou du lieu, l'usure des mécanismes, rendent l'utilisation de tels dispositifs incompatible avec un besoin de grande précision.



Les montres à quartz commercialisées à partir des années 1960, utilisent des cristaux oscillant à 32 768 Hz et ne se décalent que d'une seconde tous les six ans environ : en vieillissant, le quartz s'abîme et change progressivement de fréquence d'oscillation.



4. Les horloges atomiques

Qu'est-ce-qu' une horloge atomique ? Quel est son principe de fonctionnement ?

Prenons l'exemple de l'horloge au césium sur laquelle s'appuie la définition de la seconde. Cette horloge atomique comporte un oscillateur à quartz dont la fréquence f est contrôlée par un dispositif de régulation qui repère et corrige en temps réel les fluctuations de la fréquence afin que celle-ci soit stable et la plus exacte possible.

Ce dispositif s'appuie sur une transition électronique atomique du césium 133 entre deux états nommés ici \mathcal{E}_1 et \mathcal{E}_2 (voir document page suivante).

C'est donc un oscillateur à quartz qui est à la base d'une horloge atomique à jet de césium, les atomes de césium n'étant là que pour contrôler et ajuster la fréquence du signal généré par le quartz : c'est un étalon passif.

Qu'apportent les horloges atomiques dans la mesure du temps ?

Il est difficile de réaliser deux horloges mécaniques ou deux horloges à quartz identiques car leur fréquence d'oscillation dépend de leur géométrie (construction des balanciers, taille du quartz) : elles ne sont pas exactes. Par ailleurs la fréquence de ces horloges varie au cours du temps (modification de leur forme par l'usure, changement de température) : de telles horloges manquent de stabilité.

Pour l'horloge atomique au césium, les atomes de césium 133 sont tous identiques, ils ont et gardent les mêmes propriétés (ils ne s'usent pas). L'énergie des photons émis lors de la transition est universelle et immuable comme la fréquence $\nu_0 = \frac{\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1}{h}$ du rayonnement électromagnétique associé. Ceci explique, en partie, l'évolution de la précision entre les meilleures horloges atomiques au césium (10 ps/jour).

Comment améliore-t-on la précision des horloges atomiques ?

Plusieurs voies sont explorées actuellement :

- Augmenter la fréquence du rayonnement électromagnétique dans l'horloge, en utilisant une fréquence proche du visible ($f=10^{15}$ Hz) au lieu de la fréquence micro-onde du césium ($f=10^{10}$ Hz). Ainsi, les horloges à atomes de strontium utilisent un rayonnement dans le rouge et les horloges à atomes de mercure un rayonnement dans l'ultra violet ;
- Augmenter la durée d'interaction entre les atomes et le rayonnement car plus cette durée d'interaction est longue, plus la précision est améliorée (la détection des atomes ayant subi la transition est améliorée)

5. Exemples de sujets

L'horloge à balancier

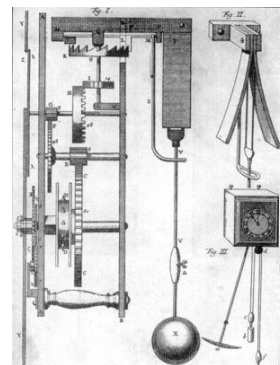
En 1657, Huygens a dessiné la première horloge à balancier du monde, la faisant fabriquer par un horloger de La Hague. Après Galilée, Huygens a réalisé qu'un pendule permet de mesurer le temps avec régularité, et serait donc plus fiable que les horloges existantes. Il y ajoute un dispositif constitué d'une masse et d'un système d'engrenage pour entretenir les oscillations qui ont tendance à s'amortir.

Meilleur mathématicien que Galilée, Huygens a établi la formule d'une oscillation complète: dans une horloge à balancier, la pseudo-période T_0 vérifie la relation $T_0 =$

$$2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Les horloges à balancier sont restées les plus précises du monde pendant presque 300 ans et ont changé la face de la science et de l'astronomie en particulier.

D'après « le livre du temps » d'Adam Hart-Davis

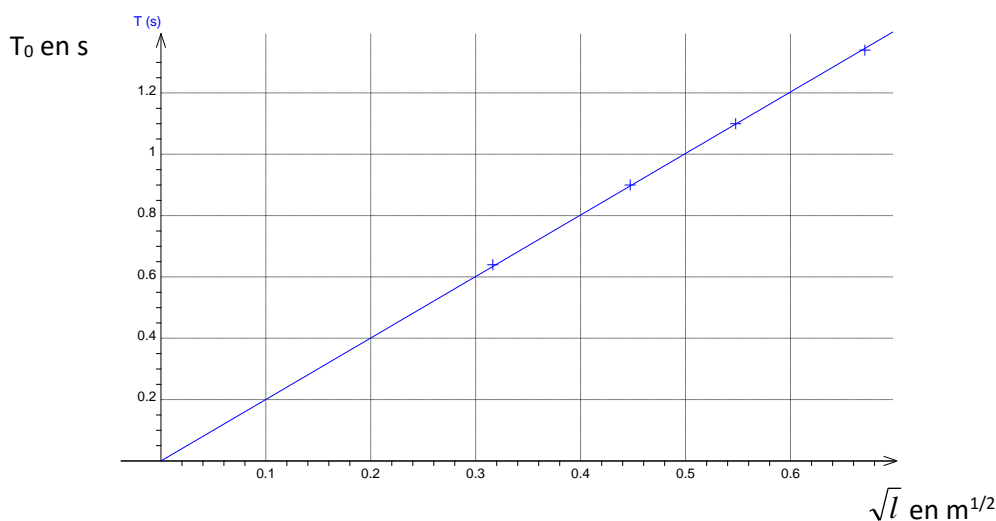


- 1-1) Schématiser un pendule à l'équilibre, représenter et nommer les forces appliquées.
- 1-2) Que peut-on dire de ces forces à l'équilibre ? Justifier.
- 1-3) Pseudo-période T_0 du pendule.
 - 1-3-1) Que représente la grandeur l dans l'expression de T_0 ?
 - 1-3-2) Montrer que T_0 est homogène à un temps.
- 1-4) Expliquer la phrase « pour entretenir les oscillations qui ont tendance à s'amortir ».

Un pendule qui bat la seconde

Des élèves d'une terminale S procèdent à une série de mesures. Le protocole établi par les élèves est le suivant : « écarter le pendule de sa position d'équilibre et faire osciller le pendule avec une amplitude initiale égale ou inférieure à 20° et sans vitesse initiale. A l'aide d'un chronomètre, mesurer la durée Δt de 10 oscillations »...

Les résultats expérimentaux et un traitement informatique conduisent à la courbe suivante : $T_0 = f(\sqrt{l})$.



Donnée : $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$

2-1) Définir la période d'un pendule.

2-2) Pourquoi est-il préférable de mesurer la durée de 10 oscillations ?

2-3) A partir de la courbe obtenue, montrer que l'expression théorique donnée par Huygens pour la période propre d'un pendule est vérifiée.

2-4) Pour mesurer le temps, on utilise un pendule qui « bat la seconde ». Quelle doit être la longueur du pendule utilisé ?

2-5) Un élève reprend l'expérience en écartant un pendule de longueur $l = 20 \text{ cm}$ d'une amplitude initiale θ_A mais en lui communiquant une vitesse $v_A = 1,0 \text{ m.s}^{-1}$.

Le pendule atteint alors le point B avec une vitesse nulle.

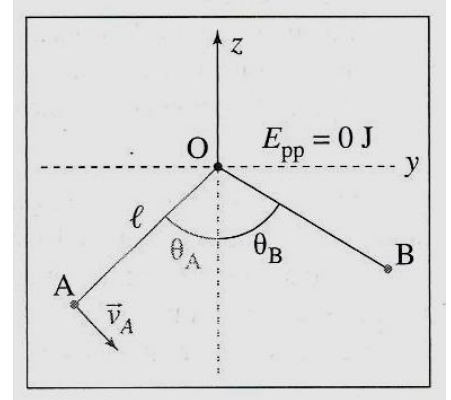
Les frottements sont supposés négligeables.

2-5-1) Etablir l'expression de l'altitude z en fonction de l et θ .

2-5-2) En déduire l'expression de l'énergie potentielle du pendule, le niveau de référence étant placé en O.

2-5-3) Donner l'expression de l'énergie mécanique du pendule.

2-5-4) En déduire l'expression de l'amplitude maximale θ_B de ce pendule en fonction de l , g , θ_A et θ_B .



Horloge et GPS

Le GPS comprend une constellation de 24 satellites. A l'aide d'un calculateur électronique, à partir de l'heure d'émission et de l'heure de réception, le système détermine la position de l'utilisateur. Les horloges atomiques embarquées dans les satellites GPS sont extrêmement précises mais il faut cependant tenir compte de la dilatation des durées...



Si l'on considère n'importe quel phénomène se produisant dans le satellite en mouvement, sa durée telle qu'elle est mesurée par l'horloge du satellite est inférieure à la durée du même phénomène telle que la mesurent les horloges terrestres. C'est la fameuse dilatation du temps prévue par la relativité restreinte.

Ces satellites se déplacent à plus de 20 000 km d'altitude, à la vitesse de $3\,874 \text{ m.s}^{-1}$. Leurs horloges retardent alors par rapport aux horloges terrestres de $7,1 \mu\text{s}$ par jour ce qui correspondrait à une erreur de position de 2 km par jour si elle n'était pas corrigée.

D'après Courty et Kierlik, « Connaître sa position, un problème de relativité ».

Données :

- La relation entre durée propre Δt_p et durée mesurée Δt_m est :

$$\Delta t_m = \gamma \times \Delta t_p \quad \text{avec} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

- $c = 3,00.10^8 \text{ m.s}^{-1}$

3-1) Expliquer brièvement ce qu'est « la fameuse dilatation des temps prévue par la relativité restreinte ».

On dispose de 2 horloges atomiques : l'horloge 1 reste sur Terre et l'horloge 2 est embarquée sur le satellite GPS.

On s'intéresse à la durée séparant 2 événements se produisant à bord du satellite.

3-2) Définir le référentiel propre associé à ces événements.

L'horloge 1 sur Terre mesure une durée de 1 jour.

3-3) Exprimer puis calculer la durée mesurée par l'horloge 2 du satellite et retrouver la valeur du retard indiquée dans le texte.

3-4) Pourquoi est-il nécessaire de corriger ce retard ?

Principe de l'horloge atomique au césium

