

Oscillateurs et mesure du temps

Très tôt dans l'histoire de l'humanité, les phénomènes périodiques ont été utilisés pour mesurer le temps. Les premiers ont été les événements astronomiques puis, à mesure que les savoirs se sont développés, l'Homme a mis au point des dispositifs mécaniques conçus pour « fabriquer » le temps. Nous allons étudier ici deux systèmes mécaniques simples : le pendule pesant et le pendule élastique.

1 - Etude du pendule pesant

Un pendule pesant peut être constitué d'une ficelle de longueur ℓ à laquelle on attache une masse m . Ce pendule, mis en mouvement en le lâchant ficelle tendue, présente une évolution périodique que l'on se propose ici de caractériser. Vous disposez d'un pendule modulable, d'un chronomètre, d'un aimant, d'une bobine et d'un PC.

1. Etablir un protocole expérimental permettant la mesure de la période T des oscillations du pendule avec la plus petite incertitude Δt possible. *Manque d'inspiration ? Vous pourrez vous reporter à la fiche « Induction ».*
2. Réaliser les mesures nécessaires pour étudier l'influence sur T de ℓ .
3. Utiliser l'application [isochronisme.swf](#) pour conclure sur l'influence sur T de l'amplitude initiale du lâcher θ_0 .

4. La théorie prévoit que $T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}$.

- a. Vérifier la cohérence dimensionnelle de cette relation.
 - b. Les mesures réalisées corroborent-elles ce résultat théorique ? Justifier soigneusement.
 - c. Que dire de l'influence de la masse m sur T ? Comment le vérifier expérimentalement ?
 - d. Quelle est la longueur du pendule dont la période vaut 2,00 s ? Justifier alors la possibilité envisagée au XVIII^{ème} siècle d'utiliser le pendule simple pour définir le mètre.
5. L'esprit d'universalité des philosophes du XVIII^{ème} siècle exigeait que le mètre puisse être adopté par tous les peuples et qu'il ait une valeur éternelle : « à tous les temps, à tous les peuples ». L'une des conséquences de cette exigence était que le mètre puisse être réalisé en tout lieu de la Terre. Formuler une conclusion quant à la raison qui conduit à l'abandon d'utiliser le pendule pour la définition du mètre.

2 - Etude du pendule élastique

Un ressort simple permet également de réaliser un oscillateur mécanique : suspendu à une potence, on lui attache une masse m et on l'écarte de sa position d'équilibre. Vous disposez d'un ressort et d'un lot de masses marquées.

2.1 - Détermination statique de la constante de raideur du ressort

On rappelle que la constante de raideur k d'un ressort s'exprime en newtons par mètre. Elle n'est autre que la constante de proportionnalité (loi de Hooke) entre la force F exercée par le ressort et son élongation x en mètre (nulle au repos). Proposer un protocole pour déterminer k le plus précisément possible.

2.2 - Période de l'oscillateur élastique

Proposer une expression de la période T du pendule élastique en fonction de m et de k à l'aide des dimensions de ces grandeurs.

On rappelle que L , M et T désignent les dimensions longueur, masse et temps ; $[u]$ désigne la dimension de u .

2.3 - Vérification expérimentale

Vous disposez d'un ressort et de masses marquées. A l'aide de ce matériel, affinez la relation que vous avez conjecturée au 2.2.

Indice : les relations caractéristiques de phénomènes périodiques font souvent intervenir le nombre π , comme dans l'expression de la période propre du pendule simple ci-dessus. Logique, non ?

2.4 - Détermination dynamique de la constante de raideur du ressort

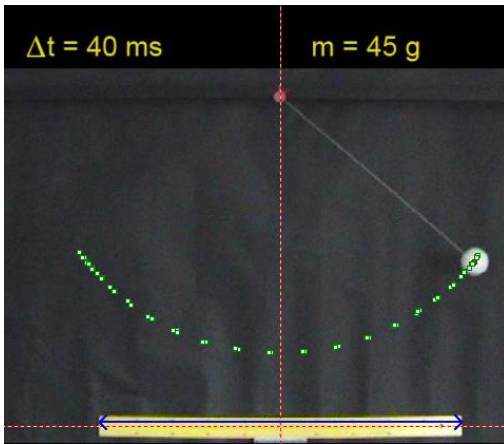
A l'aide des résultats précédents, proposez une méthode de détermination de la constante de raideur d'un ressort.

D'après vous, le pendule élastique est-il un système mécanique plus adapté à la mesure du temps que le pendule ? Commenter.

3 - Etude de l'amortissement des oscillateurs mécaniques

Nous disposons de deux situations d'étude du pendule pesant : l'une résulte d'une acquisition vidéo, l'autre d'un enregistrement par rhéographie.

Ces études sont menées dans le référentiel terrestre du laboratoire que l'on pourra doter d'un repère orthonormal (O, \vec{i}, \vec{j}) dans lequel les positions du centre d'inertie de la masse pourront être suivies au cours du temps.



1^{ère} situation : acquisition vidéo [pendule_simple.avi](#)

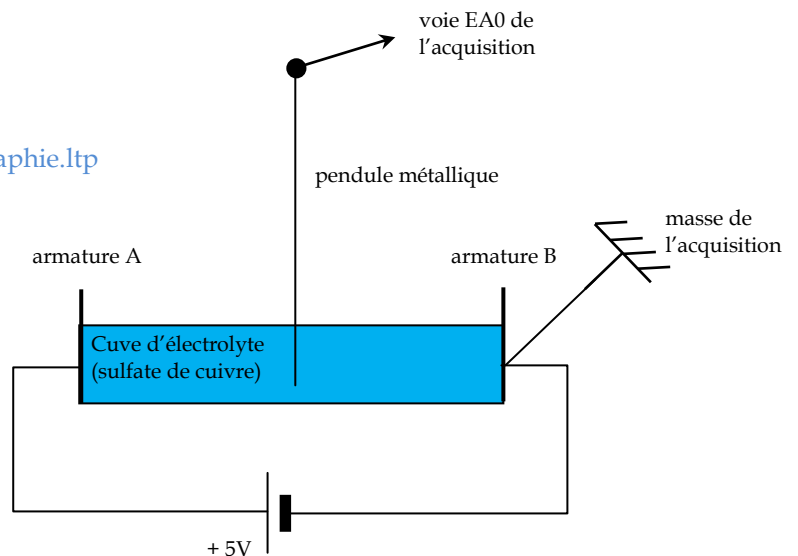
Le mouvement d'un pendule simple est enregistré à l'aide d'une webcam à raison de 40 images par seconde. Le pendule est constitué d'une masse $m = 45 \text{ g}$ accrochée par une tige rigide inextensible. L'échelle de l'enregistrement est donnée par la règle jaune (1,00 m).

1. Quelle est la période du pendule ?
2. Tracer l'évolution de l'énergie mécanique du pendule au cours du temps et commenter.
3. Retrouve-t-on ce résultat sur l'étude énergétique (les fonctions énergétiques ont-elles la même période ?) ?

2^{ème} situation : enregistrement rhéographique [rheographie.ltp](#)

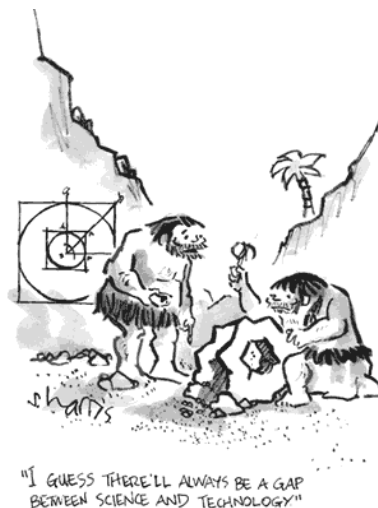
Le principe de l'enregistrement rhéographique est schématisé ci-contre.

1. Qu'est-ce qu'une solution électrolytique ?
2. Pourquoi le pendule doit-il ici être entièrement métallique ?
3. Que mesure l'interface d'acquisition ?
4. En quoi la grandeur acquise permet-elle de suivre la position du pendule au cours du temps ?
5. Comment interpréter les résultats obtenus ?



4 - Conclusion

A la lumière de ces résultats, commentez l'utilisation d'un pendule en tant qu'instrument de mesure du temps.



Précision de la mesure du temps

1 – Evolution historique de la définition de la seconde

Trois définitions de la seconde se sont succédé, liées au progrès des instruments de mesure du temps et à l'évolution des besoins en précision (Fig. 1).

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 de 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 hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.
Commentaire	Le jour solaire fluctue, ce qui rend instable sa moyenne (Fig. 2).	Cette échelle, très stable (écart d'une seconde en 10 ans), fut rapidement supplantée.	Des horloges atomiques disséminées dans le monde entier donnent une référence universelle du temps.

Fig. 1 : les définitions de la seconde

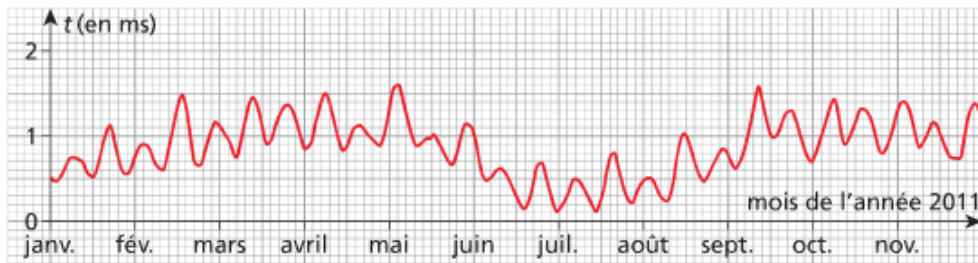


Fig. 2 : excès du jour solaire constaté en 2011 par rapport au jour solaire théorique

2 – Le pendule et la pendule

Une pendule (ou horloge à balancier) utilise les oscillations d'un pendule (le balancier), le plus souvent métallique (Fig. 3).

- Pour de petites amplitudes d'oscillation, un pendule de longueur ℓ oscille avec une période $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}$ où g est l'intensité du champ de pesanteur.
- La variation relative de longueur des métaux sous l'effet des changements de température est comprise entre 1.10^{-6} et 20.10^{-6} par kelvin.
- L'intensité de pesanteur varie avec l'altitude : elle diminue de 3.10^{-6} par mètre, en valeur relative, au voisinage du sol.
- L'intensité de pesanteur varie également du fait de l'aplatissement de la Terre : elle varie de 0,7 % entre l'équateur et les pôles.



Fig. 3 : pendule à balancier

3 – Histoires d'horloges

Les horloges mécaniques existent depuis le XVI^{ème} siècle. A la fin du XVIII^{ème} siècle, l'horloger britannique John Harrison réalise un chronomètre ne dérivant que d'une seconde tous les dix jours.

Aujourd'hui, les chronomètres mécaniques les plus performants mesurent le millième de seconde, mais leur stabilité est comparable. Les cristaux de quartz présentent des propriétés piézoélectriques, c'est-à-dire que leur excitation électrique permet d'engendrer des oscillations très stables pouvant servir de référence de temps.



Fig. 4 : la montre n'est qu'un pendule élastique avec ressort spiral.

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



Fig. 5 : horloges à quartz

Les premières horloges atomiques datent des années 1950. Utilisant les radiations, très stables dans le temps, produites par des atomes de césium, pour synchroniser des horloges à quartz, elles permettent d'obtenir des écarts très faibles, de l'ordre d'une seconde pour 10^{15} s, voire moins dans les années à venir.



Fig. 6 : Des horloges atomiques de ce type sont embarquées dans les satellites GPS.

Questions

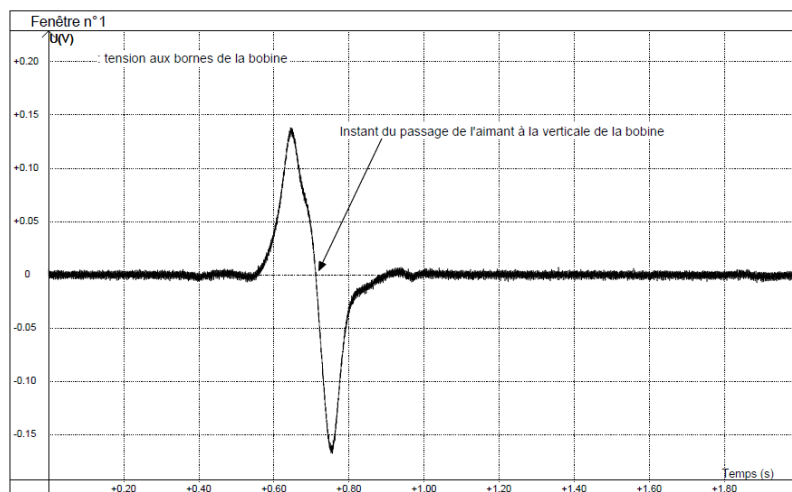
1. Calculer la longueur ℓ_0 d'un pendule métallique de période $T_0 = 2,00$ s avec $g = 9,81 \text{ m.s}^{-1}$ (gravité terrestre à l'équateur).
2. Estimer la période du pendule si le paramètre suivant est changé,
 - a. Température diminuée de 20°C (alternance été-hiver) \rightarrow période T_1
 - b. Altitude augmentée de 2 000 m \rightarrow période T_2
 - c. Transport de l'équateur vers les régions polaires \rightarrow période T_3
3. Pour chacune des périodes T_i déterminées à la question précédente, proposer également une estimation des écarts relatifs $\frac{|T_i - T_0|}{T_0}$.
4. Relever les *stabilités* des horloges mécaniques, à quartz et atomiques et les présenter aussi sous forme d'un écart relatif.
5. Présenter dans un tableau les ordres de grandeur des écarts relatifs calculés aux questions précédentes. Commenter ce tableau.
6. En utilisant l'ensemble des documents et les réponses aux questions, et en ajoutant éventuellement des recherches personnelles complémentaires, proposer un court texte expliquant pourquoi les deux définitions astronomiques de la seconde ont dû être remplacées.

Le phénomène d'induction

Rien ne destinait Faraday à une carrière scientifique sinon sa soif de connaître. D'origine modeste (son père est forgeron), il quitte l'école à quatorze ans pour entrer comme courtier chez un libraire. Il en profite pour dévorer tous les livres qui passent à sa portée. Sa culture est bientôt remarquée par un client du magasin qui le recommande à Humphry Davy. Celui-ci l'engage comme assistant, en 1813, au laboratoire de la "Royal Institution". Il entre à la "Royal Society" de Londres en 1824 et, l'année suivante, en devient directeur du laboratoire.

L'électromagnétisme est le domaine où il donne toute la mesure de son talent expérimental imaginatif. Sa première publication sur l'électromagnétisme date de septembre 1821. Faraday y montre comment un aimant peut tourner autour d'un courant électrique et inversement comment un élément de circuit électrique peut tourner autour d'un aimant. Il vient de découvrir le phénomène d'induction.

Reliez une bobine à un oscilloscope ou une centrale d'acquisition : en passant un aimant devant l'entrefer de la bobine (simple enroulement de fil de cuivre à spires non jointives), vous constaterez l'apparition d'une tension à ses bornes !



En fixant un aimant à un objet mobile et en le faisant passer à proximité d'une bobine, vous tenez un excellent détecteur de mouvement !

