

I - Présentation : Systèmes mécaniques oscillants

1) Exemples dans le monde qui nous entoure

Un mouvement qui se répète identique à lui-même à intervalles de temps consécutifs égaux est dit périodique. Il est remarquable que la nature nous offre couramment quantités d'exemples de ces phénomènes qui semblent inhérents à la nature même de l'Univers. Un électron a un comportement périodique, que nous pouvons décrire avec le même langage que celui d'une étoile à neutrons en rotation sur elle-même. La rotation de la Terre autour du Soleil, l'oscillation d'une balançoire, le battement rythmé du cœur, le mouvement de la tour Eiffel sous le vent, la vibration du sol au passage d'un véhicule lourd et rapide, la suspension d'une voiture passant sur un obstacle, sont tous plus ou moins périodiques. Ces phénomènes répétitifs sont toujours des mouvements, mais pas toujours descriptibles à notre échelle par les lois de la dynamique. (son, réaction chimique, vibration d'un cristal de quartz, ...)

Parmi ces phénomènes répétitifs, certains se font sur une trajectoire fermée toujours dans le même sens et **d'autres sont des mouvements de va-et-vient**, ce sont eux que nous appelons mouvement oscillatoires, les systèmes qui décrivent de tels mouvements sont logiquement appelés **systèmes oscillants**.

2) Caractéristiques d'un système oscillant

Un phénomène mécanique oscillant est caractérisé par un mouvement de va-et-vient qui se répète identique à lui-même de façon régulière au cours du temps (périodiquement).

Les grandeurs qui décrivent un système oscillant constituent deux catégories :

- celles qui rendent compte de la répétition du phénomène dans le temps

la période T : plus petite durée au bout de laquelle le phénomène se répète identique à lui-même, durée d'une oscillation, durée d'un cycle (en seconde s) ;

la fréquence $f = 1/T$ (en Hz dans le S.I.). Elle représente ici le nombre d'oscillations par seconde ;

- celles qui caractérisent le phénomène lui-même (au cours d'une oscillation, d'un cycle du mouvement oscillatoire), coordonnées, trajectoire, etc. Une grandeur caractéristique de tout système oscillant doit toutefois être mise en avant :

L'amplitude.

II - Le pendule simple

1) Rappels

- Pendule pesant : tout système indéformable dont un point différent de G est fixé.
(voir exemples et schémas)
- Pendule simple, définition : masse ponctuelle accrochée à l'extrémité d'un fil inextensible, de masse négligeable et dont l'autre extrémité est fixée.
(schéma annoté)

2) Activité expérimentale

Problématique : fabriquer un pendule simple « qui bat la seconde »...

Cela passe par une description mécanique rigoureuse du pendule

Pistes :

- Pendule simple, justifier la position d'équilibre (on applique le principe de l'inertie).
- Pendule simple, écart à l'équilibre, abscisse angulaire, amplitude. (schéma complet incluant les forces exercées).
- Pendule simple, description des oscillations en l'absence de frottements, construction du graphe $\alpha=f(t)$, fonction sinusoïdale où sont mises en évidence période et amplitude (on pourra reprendre un fichier vidéo et l'exploiter judicieusement)
- Pendule simple, influence de différents paramètres sur la valeur de T :
 - amplitude $\alpha_{\max}$;
 - valeur m de la masse accrochée ;
 - longueur l du pendule (construction de graphe abscisse-ordonnée fortement conseillée).
 - Expression de T_0 (recherches et déduction d'après résultats expérimentaux).

Résolution de la problématique, c'est maintenant !

On terminera en vérifiant que les résultats expérimentaux permettent de valider la formule $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$ (qui ne sera pas démontrée)

Aspect énergétique

- en négligeant les frottements ainsi que la masse du fil, en considérant la masse suspendue comme ponctuelle, exprimer l'énergie mécanique totale du système en mouvement.

- Construire la courbe $E_p = f(\alpha)$ entre $-\alpha_0$ et α_0 ;
- considérant qu'un tel système oscille à énergie mécanique constante (oscillateur libre non amorti, aucune dissipation de l'énergie par frottements), tracer sur le même graphe la courbe $E_c = f(\alpha)$ entre $-\alpha_0$ et α_0 .

- quand le pendule est lâché sans vitesse d'une amplitude initiale $\alpha_0 = 20^\circ$, quelle est sa vitesse quand il passe à la verticale ?

III Le système masse-ressort

Etudier le mouvement périodique d'une masse suspendue à un ressort vertical en mesurant la période T des oscillations.

Quelques données théoriques sur les ressorts

Lorsque l'on maintient un ressort allongé ou comprimé par rapport à sa longueur au repos, il exerce sur l'opérateur une force appelée tension et caractérisée par le vecteur :

$$\vec{T} = -k \times \vec{A_0A}$$

Si une extrémité du ressort est accroché à un point fixe, A_0 est la position de l'autre extrémité au repos et A sa position après allongement ou compression du ressort.

On peut utiliser un vecteur unitaire $\vec{i}$ de même direction que celle définie par le ressort et de sens correspondant à l'allongement du ressort. l'expression de $\vec{T}$ devient alors :

$$\vec{T} = -k \cdot x \cdot \vec{i} \text{ avec } x = \overline{A_0A}, \text{ allongement du ressort}$$

(positif si le ressort est allongé, négatif s'il est comprimé).

k est appelée (constante de) raideur du ressort (unité : $N.m^{-1}$)

Rappel : lorsqu'un ressort est allongé ou comprimé d'une valeur x, il possède une énergie potentielle élastique $E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2$

Etude des oscillations

- Préliminaire : en manipulant le ressort au repos, déterminer sa raideur (vous présenterez par écrit la méthode choisie).

- Faire osciller le ressort et mesurer le plus précisément possible la période.

- Vérifier l'exactitude de l'expression : $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

(cette expression pourra être démontrée... en AP)

Aspect énergétique

Exploitation de fichier vidéo de système masse-ressort horizontal en oscillation

- en négligeant les frottements ainsi que la masse du ressort, en considérant la masse suspendue comme ponctuelle, exprimer l'énergie mécanique totale du système en mouvement.

- Construire la courbe $E_p = f(x)$ entre $-x_0$ et x_0 .

- considérant qu'un tel système oscille à énergie mécanique constante (oscillateur libre non amorti, aucune dissipation de l'énergie par frottements), tracer sur le même graphe la courbe $E_C = f(x)$ entre $-x_0$ et x_0 .

- quand le ressort, allongé de x_0 , est lâché sans vitesse, quelle est sa vitesse quand il passe par la position A_0 ($x = 0$) ?

IV Conclusions

Un oscillateur libre non amorti évolue :

- à énergie mécanique constante,
- à amplitude constante.

$$E = E_C + E_P = \text{cste}$$

Au cours des oscillations, il y a perpétuellement transformation d' E_C en E_P et vice-versa.

Quand l'élongation est maximum (amplitude), $E_C = 0$ et E_P est maximum.

Quand on passe par l'élongation zéro, E_C est maximum et E_P est nulle (ou minimum suivant le choix de l'origine des E_P).

V Remarque : en présence de frottements

- Expérience :

Mise en oscillation d'un pendule considéré comme simple avec frottements fluide ou solides, enregistrement, acquisition de données, tracé de courbe $a=f(t)$.

- Résultats :

Présentation des graphes $a=f(t)$ dans les cas : régime pseudo-périodique, régime apériodique), valeur de la pseudo-période.

VI A propos de la mesure du temps...

Activité : Temps, mouvement et évolution

Document 1 le cours de physique de Feynman (1963) :

En V.O. :

"We have implied that it is convenient if we start with some standard unit of time, say a day or a second, and refer all other times to some multiple or fraction of this unit. What shall we take as our basic standard of time? Shall we take the human pulse? If we compare pulses, we find that they seem to vary a lot. On comparing two clocks, one finds they do not vary so much. You might then say, well, let us take a clock. But whose clock? .../... It is rather difficult to decide whose clock we should take as a standard. Fortunately, we all share one clock—the earth. For a long time the rotational period of the earth has been taken as the basic standard of time. As measurements have been made more and more precise, however, it has been found that the rotation of the earth is not exactly periodic, when measured in terms of the best clocks. These "best" clocks are those which we have reason to believe are accurate because they agree with each other. We now believe that, for various reasons, some days are longer than others, some days are shorter, and on the average the period of the earth becomes a little longer as the centuries pass. Until very recently we had found nothing much better than the earth's period, so all clocks have been related to the length of the day, and the second has been defined as 1/86400 of an average day. Recently we have been gaining experience with some natural oscillators which we now believe would provide a more constant time reference than the earth, and which are also based on a natural phenomenon available to everyone. These are the so-called "atomic clocks." Their basic internal period is that of an atomic vibration which is very insensitive to the temperature or any other external effects. These clocks keep time to an accuracy of one part in 10⁹ or better. .../... We may expect that since it has been possible to build clocks much more accurate than astronomical time, there will soon be an agreement among scientists to define the unit of time in terms of one of the atomic clock standards."

En V.F. :

« Nous avons dit qu'il est commode de commencer avec une certaine unité étalon de temps, par exemple un jour ou une seconde, et de rapporter les autres temps à certains multiples ou certaines fractions de cette unité. Que devons-nous prendre comme notre étalon de base de temps ? Devons-nous choisir le pouls humain ? Si nous comparons les pouls entre eux, nous trouvons qu'ils semblent beaucoup varier. En comparant deux horloges, on trouve qu'elles ne varient pas autant. Vous pouvez alors dire : « Bien, choisissons une horloge. » Mais l'horloge de qui ?.../... Il est assez difficile de décider de qui nous choisirons la pendule pour en faire un étalon. Heureusement nous disposons tous d'une même horloge – la Terre. Pendant longtemps, la période de rotation de la Terre a été choisie comme l'étalon de base du temps. Lorsque les mesures ont été rendues de plus en plus précises, on a trouvé cependant que la rotation de la Terre n'est pas exactement périodique, lorsqu'elle est mesurée avec les meilleurs horloges. Ces « meilleures » horloges sont en accord entre elles. Nous pensons maintenant que, pour diverses raisons, certains jours sont plus longs que d'autres, certains jours plus courts, et qu'en moyenne la période de la Terre augmente un peu au cours des siècles.

Jusqu'à très récemment, nous n'avions rien trouvé de mieux que la période de la Terre, ainsi toutes les horloges se référaient à la longueur du jour, et la seconde avait été définie comme 1/86400 d'un jour moyen. Récemment, nous avons acquis de l'expérience avec certains oscillateurs naturels dont nous pensons maintenant qu'ils fourniront une référence de temps plus constante que la Terre, et qu'ils sont également basés sur des phénomènes naturels accessibles à tout le monde. Ce sont ce que l'on appelle les « horloges atomiques ». Leur période interne de base est celle d'une vibration atomique qui est très peu sensible à la température ou à tout autre effet externe. Ces horloges conservent leur régularité à une part pour 10^9 ou mieux.../... Puisqu'il est possible de construire des horloges beaucoup plus précises que le temps astronomique, nous pouvons bientôt nous attendre à un accord entre les scientifiques, pour définir l'unité de temps en termes de l'un des étalons d'horloge atomique.

Document 2 : Définitions de la seconde

La définition de la seconde, l'unité SI de temps, a été établie selon les connaissances et les possibilités techniques de chaque époque.

Elle a d'abord été définie comme la fraction 1/86400 du jour solaire terrestre moyen. L'échelle de temps associée est le temps universel TU. Cette durée est proche de la période moyenne du battement du cœur d'un homme adulte au repos.

En 1956, pour tenir compte des imperfections de la rotation de la Terre qui ralentit notamment à cause des marées, elle a été basée sur la révolution de la Terre autour du Soleil et définie comme la fraction 1/31 556 925,9747 de l'année tropique 1900. C'est la seconde du temps des éphémérides TE.

Depuis la 13^e Conférence générale des poids et mesures, la seconde n'est plus définie par rapport à l'année, mais par rapport à une propriété de la matière ; cette unité de base du système international a été définie en 1967 dans les termes suivants :

La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux hyperfins $F=3$ et $F=4$ de l'état fondamental $^6S_{1/2}$ de l'atome de césium 133

La seconde, étalon de mesure du temps, est ainsi un multiple de la période de l'onde émise par un atome de césium 133 lorsqu'un de ses électrons change de niveau d'énergie. On est ainsi passé de définitions, en quelque sorte descendantes, dans lesquelles la seconde résultait de la division d'un intervalle de durée connue en plus petits intervalles, à une définition ascendante où la seconde est multiple d'un intervalle plus petit.

Lors de sa session de 1997, le Comité international a confirmé que Cette définition se réfère à un atome de césium au repos, à une température de 0 K. Cette dernière précision souligne le fait qu'à 300 K, la transition en question subit, par rapport à sa valeur théorique, un déplacement en fréquence dû aux effets de rayonnement du TAI à partir de 1997, quand elle a cessé d'être négligeable par rapport aux autres sources d'incertitude.

On dispose aujourd'hui d'une exactitude allant jusqu'à la 14^e décimale (10-14). L'exactitude et la stabilité de l'échelle dite du Temps atomique international (TAI)

obtenue principalement à partir d'horloges atomiques à jet de césium sont environ 100 000 fois supérieures à celles du temps des éphémérides. C'est d'ailleurs l'unité du SI la plus précisément connue.

De nombreuses expériences en cours sur des transitions atomiques à des fréquences optiques, beaucoup plus élevées que les 9 GHz de la définition actuelle de la seconde, indiquent clairement que les performances obtenues avec l'atome de césium sont ou seront dépassées de plusieurs ordres de grandeur dans un avenir proche. Il faut s'attendre à ce qu'une nouvelle définition de la seconde voie le jour dans la décennie 2010-2020, dès que le meilleur des différents atomes candidats (calcium, ytterbium, strontium, mercure...) aura été désigné par l'expérience. Elle sera toujours liée à une transition atomique. Cette nouvelle définition coïncidera peut-être avec l'abandon des secondes intercalaires et donc avec une définition de l'échelle de temps internationale de référence purement atomique indépendante de la rotation terrestre, donc de l'astronomie.

Questions

- 1) Etablir le lien entre la valeur 86400 évoquée dans le document 1 et diverses unités de temps (seconde, minute, heure et jour)
- 2) Etablir le lien avec la fréquence 9 GHz et le nombre de périodes (9192631770) permettant de définir la seconde (document 2)
- 3) Quelle est la différence d'énergie (en joules) entre les deux niveaux hyperfins présentés dans le document 2 ?
- 4) La valeur trouvée précédemment est-elle du même ordre de grandeur que celles que l'on mesure entre deux niveaux d'énergie électroniques traditionnels, qui sont de quelques eV ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$) ?
Commentez le résultat de la comparaison effectuée.
- 5) Synthèse : pourquoi un phénomène atomique (transition entre deux niveaux d'énergie) est-il plus fiable qu'un phénomène astronomique (rotation de la Terre) pour mener à une définition de l'unité de temps (la seconde) ?