

Préparation à l'agrégation de Sciences-Physiques ENS Physique

Physique pour les chimistes - Oscillateurs et transformations d'énergie

Lorsque certains systèmes sont perturbés, ils reviennent à l'équilibre non pas de façon monotone mais via des oscillations amorties : on parle d'oscillateurs. Un oscillateur est caractérisé par sa (ou ses) fréquence de résonance f_0 , ainsi que par le facteur de qualité associé Q , la durée des oscillations lors du retour à l'équilibre étant $\tau = Q/(\pi f_0)$. Une seconde caractéristique des oscillateurs est qu'en les forçant avec un signal harmonique à une fréquence proche de f_0 , ils sont l'objet d'oscillations de grandes amplitudes, on parle alors de résonance. Cette fois ci, le facteur de qualité quantifie la bande passante de la résonance $\Delta f = f_0/Q$.

I) Systèmes mécaniques oscillants

1) Oscillations libres du pendule simple

Si vous ne l'avez pas fait quantitativement lors du précédent TP de mécanique, utiliser le pendule simple muni d'un capteur d'angle relié à la carte SYSAM-SP5 pour :

- 1) Vérifier quantitativement que la période des oscillations dépend de l'angle, sauf dans la limite des angles (isochronisme des petites oscillations)
- 2) Estimer le facteur de qualité de cet oscillateur.

2) Étude qualitative des oscillations forcées

Référence : Quaranta, "Dictionnaire de physique expérimentale, tome 1 : la mécanique", page 240.

On utilise l'appareil schématisé sur la figure 1 : une masse est fixée par l'intermédiaire d'un ressort à un fil dont la hauteur varie périodiquement avec le temps, le fil passant sur une poulie et étant relié à un moteur.

Un tachymètre permet de mesurer la vitesse de rotation du moteur, et donc la fréquence d'excitation du système oscillant formé par la masse et le ressort. Une règle graduée permet de mesurer l'amplitude des oscillations. Mettre en place les éléments de telle sorte qu'au repos la masse soit approximativement au milieu de l'éprouvette, pour qu'elle ne tape pas le fond à la résonance.

Déterminer la fréquence du mouvement libre du système masse-ressort à l'aide d'un chronomètre. Il faut qu'elle corresponde à une fréquence accessible au moteur.

Arrêter le mouvement de la masse. Mettre le moteur en marche à basse vitesse, l'augmenter lentement, observer l'évolution de l'amplitude des oscillations. Comparer la fréquence où cette amplitude est maximale et celle du mouvement libre. Se méfier car la résonance dans l'air est aiguë et peut conduire au décrochage de la masse. Vous pouvez éventuellement essayer de réduire l'amplitude de l'excitation en accrochant le fil plus près de l'axe de rotation de la roue d'entraînement. Observer la phase relative entre le mouvement de la masse et l'excitation, pour des fréquences de part et d'autre de la résonance.

On peut induire des frottements en faisant osciller la masse dans une éprouvette remplie d'eau, une pale est fixée à cet effet sous la masse. Recommencer l'expérience, la résonance est alors moins nette, conformément à la discussion théorique précédente.

L'interprétation de la courbe de résonance (amplitude des oscillations en fonction de la fréquence d'excitation) est rendue délicate par la nature des frottements, proportionnel au carré de la vitesse dans ce régime turbulent. Son tracé n'est pas conseillé.

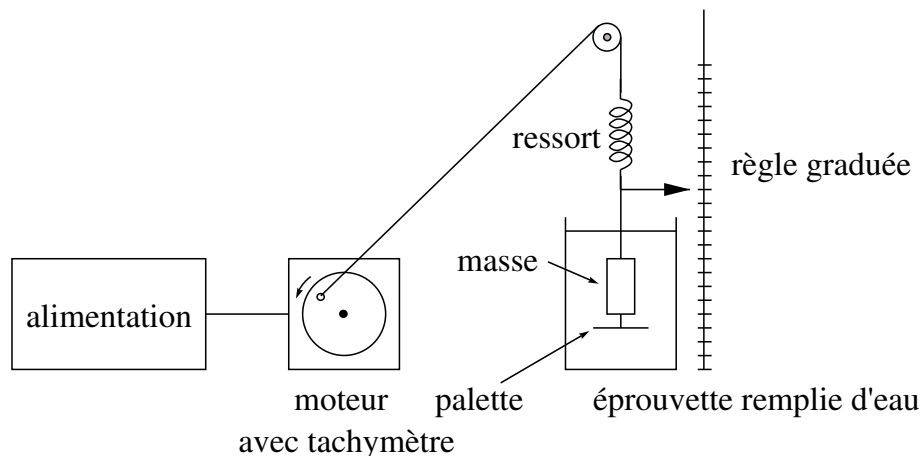


FIG. 1 – Appareil d'étude de la résonance mécanique

3) Diapason

Les oscillateurs avec de grands facteurs de qualité sont couramment utilisés pour avoir une base de temps fiable, c'est par exemple le cas du cristal de quartz présent dans les montres, mais aussi d'un simple diapason. On va ici illustrer la notion de résonance avec un diapason de fréquence propre proche du La 440.

Référence : BUP n801, p. 283, "résonance aigüe et auto-oscillation d'un diapason"

Expérience :

1) Estimer qualitativement l'ordre de grandeur du facteur de qualité de ce diapason à l'aide du temps d'amortissement des oscillations libres.

2) Réaliser le montage Fig. 1 et 3 du BUP et fixer en suivant le paragraphe 1.3.1 la capacité du condensateur variable.

3) Sans diapason, mesurer qualitativement la bande passante de la résonance en intensité du circuit électrique réalisé.

4) A l'aide d'un multimètre et du microphone présent, que l'on introduira dans la cavité de résonance du diapason, mesurer expérimentalement la courbe de résonance, puis l'ajuster par la formule théorique. En déduire la fréquence propre et le facteur de qualité de ce diapason, avec les incertitudes associées.

5) Étudier l'effet d'une charge sur une des branches (section 1.3.4) ou d'une augmentation de l'amortissement (section 2.1)

4) Résonance paramétrique

L'étude de la résonance paramétrique est facultative (cette expérience n'est pas directement utile pour les leçons mais nous l'avons laissée pour votre "culture").

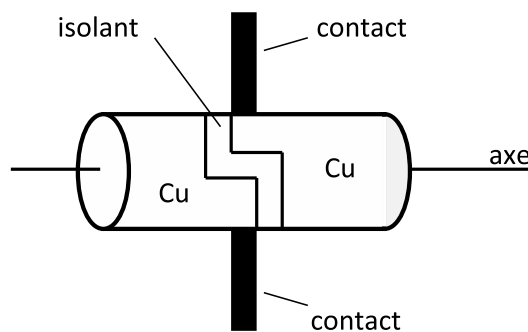
Le phénomène de résonance se produit parfois pour des fréquences d'excitation différentes de celle du mouvement libre (généralement pour des multiples entiers). L'exemple le plus simple est celui de la balançoire, que l'on peut modéliser par un pendule simple dont la longueur est diminuée à chaque passage par la verticale, et augmentée aux instants où l'angle avec la verticale est maximum. La fréquence de cette excitation est donc le double de la fréquence propre du pendule. Vous pouvez réaliser l'expérience en suspendant une masse à un fil sur lequel vous pouvez tirer pour modifier la

longueur du pendule. De manière plus spectaculaire ce phénomène est mis à profit dans le mouvement du Botafumeiro, le grand encensoir de Saint-Jacques de Compostelle.

II) Moteur à courant continu

a) Expérience qualitative :

Nous proposons ici une expérience qualitative sur un moteur didactique. On utilise comme stator une **seule** bobine qui doit être horizontale. Le rotor est alimenté par l'intermédiaire du **collecteur**, qui est la pièce maîtresse du moteur à courant continu. La figure ci-dessous explique comment les contacts doivent être disposés sur le collecteur.



Le stator et le rotor doivent être alimentés en série par un générateur continu d'environ 10 V pouvant débiter 1 A. Pour le démarrage, placer le rotor perpendiculairement au stator de façon à avoir un couple important. Faire fonctionner le système le moins longtemps possible, car les étincelles qui se produisent lors de la commutation abîment rapidement le collecteur.

Interpréter le rôle du collecteur. Vérifier que l'inversion de la polarité du générateur ne change pas le sens de rotation du moteur. Comment pourrait-on inverser le sens de rotation ?

Peut-on utiliser ce moteur avec un générateur alternatif ?

De nombreuses mesures différentes peuvent être effectuées sur le moteur à courant continu. En montage, vous serez amené à faire des choix sur les quantités mesurées et les principes que vous souhaitez illustrer. Il est important d'être organisé et de savoir à l'avance ce que l'on va faire pour ne pas se perdre dans les limbes des valeurs numériques.

b) Relation entre la tension et la vitesse de rotation (important)

Un grand intérêt du moteur à courant continu est de pouvoir commander la vitesse de rotation via la tension à ses bornes U car la dépendance entre les deux est affine. En effet, on peut écrire $U = e + RI$ (pourquoi ?), avec e la fém qui vérifie $e = K\Omega$ (K constante de couplage électromécanique), R la résistance du rotor donnée dans la notice et I l'intensité du courant dans le rotor, normalement indépendante de la tension à charge fixée. On peut donc réécrire $U = K\Omega + cste$.

On utilise le moteur à courant continu à alimentation 12 V découplée, et on hisse sur une distance fixée différentes masses ($m = 200$ g, 1 kg, 2 kg, 3 kg, etc.). Il est bien entendu possible d'effectuer une étude plus longue en utilisant un plus grand nombre de masses. Si l'on souhaite faire un point "à vide"

il faudra tout de même mettre une petite masse de sorte que le fil reste bien tendu et s'enroule correctement. On alimente le moteur avec une alimentation réglable pouvant fournir 12 V et on le branche en série avec un ampèremètre et un interrupteur. On place un voltmètre à ses bornes. L'interrupteur servira à déclencher ou stopper la remontée rapidement.

Pour fixer le moteur sur la table, on pourra utiliser deux serre-joints. Penser à placer une mousse au sol pour ne pas abîmer les masses, plutôt de couleur claire (pour faciliter le travail du logiciel Cinéris si utilisé), et penser aussi à accompagner la masse lors de sa retombée quand l'interrupteur est en position ouverte.

On propose de vérifier dans un premier temps la relation tension-vitesse en faisant varier la tension d'alimentation dans un domaine raisonnable : **on ne dépassera jamais 12 V**, et on n'imposera pas non plus des tensions trop faibles (à juger selon la charge imposée, ne pas aller en dessous de 8 V pour les grandes charges). Vérifier également que le courant ne prend pas des valeurs trop importantes.

Pour obtenir la vitesse de remontée de la masse, il est possible d'avoir recours à une webcam et d'obtenir toutes les données via les logiciels Cinéris et Igor. Cependant, ce procédé s'avère très chronophage et donc le répéter un grand nombre de fois en préparation ou même juste une seule fois devant le jury peut être problématique le jour de l'oral. Il est donc conseillé de ne prendre qu'une seule courbe donnant la position d'une des masses en fonction du temps et d'évaluer le domaine des hauteurs sur lequel le moteur fonctionne effectivement à vitesse constante.

Dès lors le reste des mesures peut être effectué plus rapidement au chronomètre : on mesure le temps mis par une masse pour être remontée depuis une hauteur h_1 jusqu'à une hauteur h_2 avec h_1 et h_2 dans les limites du domaine établi précédemment.

Pour mesurer également la valeur de la tension et de l'intensité (qui servira plus tard) quand on est seul, on pourra répéter deux fois la même mesure à chaque fois : on mesure d'abord U et I puis le temps de remontée Δt entre h_1 et h_2 . Vérifier que I ne varie presque pas pour une masse donnée quand on fait varier U .

Relier la vitesse angulaire de rotation du moteur Ω à la vitesse de remontée de la masse v et au rayon de la bobine d'enroulement du fil r .

Tracer alors la courbe donnant $U(\Omega)$ pour une masse fixée et en déduire le coefficient K . On pourra par exemple faire une première mesure sans charge puis pour différentes masses et vérifier que K change peu.

L'ordonnée à l'origine permet de retrouver la valeur de R . Comparer à la valeur donnée dans la notice. À quoi cette ordonnée à l'origine correspond-elle physiquement ?

c) Caractéristique et point de fonctionnement

Tracer les courbes $\Gamma_u(\Omega)$ à U fixé pour plusieurs valeurs de U . On doit obtenir un ensemble de droites parallèles. Ces courbes, les caractéristiques du moteur, sont également importantes pour sa caractérisation.

Où sont les points de la remontée à vide ? Que dire du couple au démarrage ?

Quel est le lien entre caractéristique et point de fonctionnement ?

d) Variation du rendement avec la charge

On peut enfin remonter à la variation du rendement de la conversion électrique-mécanique avec la charge, dans le cas d'un moteur à courant continu.

La puissance électrique fournie au système est donnée par $P_e = UI$ et la puissance utile est donnée par $P_u = \Gamma_u \Omega = mgv$. En déduire le rendement.

Tracer le rendement en fonction de la puissance utile à U fixé (de préférence à la tension nominale i_e 12 V). On peut aussi montrer que les rendements atteints quand le moteur fonctionne à sa tension nominale sont supérieurs à ceux atteints pour des tensions inférieures. Mais qu'appelle-t-on point de fonctionnement nominal ? (**Notion importante !**).

III) Cellules photovoltaïques

1) Généralités

Les cellules photovoltaïques permettent de convertir l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique. Elles se présentent sous la forme de plaques sombres, équipées de bornes pour brancher des charges (accumulateur ou charge utile en utilisation directe). Il existe différentes technologies de cellules photovoltaïques. Nous allons uniquement nous intéresser aux technologies silicium, qui constituent la grande majorité des cellules commerciales. Les cellules photovoltaïques sont optimisées pour fournir la puissance maximale pour un éclairage dont la distribution spectrale est celle du rayonnement solaire.

Sous un éclairage donné, les caractéristiques importantes d'une cellule photovoltaïque sont :

- Une courbe Courant-Tension ($U ; I$)
- Une courbe Puissance-Tension ($U ; P$).

Quatre grandeurs physiques importantes caractérisent une cellule photovoltaïque :

- La tension à vide : V_{co} . Il s'agit de la tension aux bornes d'une cellule éclairée mais non raccorder.
- Le courant de court-circuit : I_{cc} . Il s'agit du courant débité par une cellule éclairée et raccorder à elle-même par un simple fil.
- Le point de puissance maximale : MPP (en anglais : maximal power point) est obtenu pour une tension et un courant optimaux.
- Le rendement η . Il s'agit de la puissance maximale produite divisée par la puissance lumineuse reçue.

Par la suite, nous nous proposons de tracer les caractéristiques ($U ; I$) et ($U ; P$) d'une cellule photoélectrique en silicium polycristallin (matériau de la majorité des panneaux solaires commerciaux) pour une situation d'éclairage donnée. Nous déterminerons aussi les quatre grandeurs physiques mentionnées ci-dessous. Au cours du TP, pensez à tenir compte des incertitudes lors de vos mesures ; en particulier lors de la détermination du rendement η .

2) Mesure des caractéristiques

Pour mesurer les caractéristiques de la cellule photovoltaïque en silicium polycristallin, réaliser le montage suivant. Afin d'avoir un éclairage le plus homogène possible, placer la cellule à étudier à une trentaine de centimètres d'une quartz-iode sans condenseur. Placer également à côté (à la même distance du filament) un fluxmètre permettant de mesurer le flux surfacique d'énergie lumineuse incidente.

Fichier :Cellule photo chimistes.svg Réaliser le montage électrique suivant :

Comme charge, on prendra une résistance variable allant de 1Ω à $1 \text{ k}\Omega$ (boîte à décades).

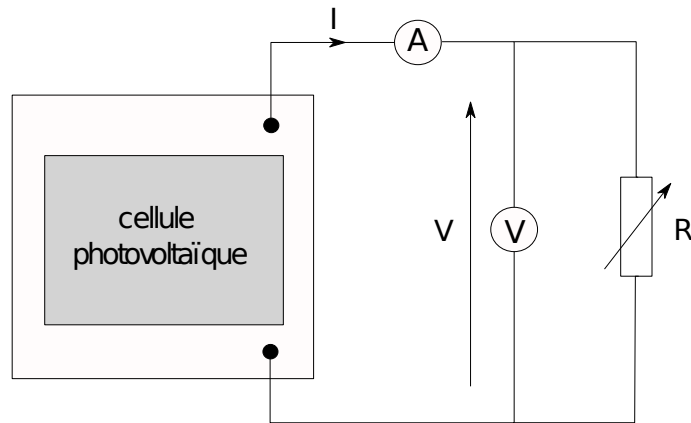


FIG. 2 – Montage électrique de la cellule photovoltaïque

- Déterminer rapidement V_{co} et I_{cc} .
- Mesurer la tension et le courant délivré pour plusieurs valeurs de résistance de charge, et reconstruire les caractéristiques (U ; I) et (U ; P). Identifier V_{co} et I_{cc} sur les caractéristiques.
- Trouver la valeur de la puissance maximale délivrée par la cellule P_m , ainsi que les coordonnées du point de puissance maximale (I_m, U_m).
- Rendement η . À l'aide du fluxmètre, mesurer le flux d'énergie surfacique incident F . En mesurant précautionneusement la surface de la cellule photovoltaïque S , calculer le rendement $\eta = P_m / (FS)$.
- Incertitudes sur P_m , F et S ? Incertitude sur le rendement ?

3) Rendement des différents types de cellules (facultatif)

Nous avons étudié précédemment le rendement d'une cellule photovoltaïque en silicium polycristallin, qui correspond à un bon compromis coût/rendement pour les panneaux solaires commerciaux.

Nous disposons dans la collection de trois types de cellules photovoltaïques :

- cellules en silicium amorphe,
- cellules en silicium polycristallin,
- cellules en silicium monocristallin.

Reprendre l'étude précédente et déterminer le rendement pour les différents types de cellules. Quelle hiérarchie de rendement suivant le type de cellule observe-t-on ? Proposer une explication.