

agrégation de physique 2002 – 2003

MP36 : ondes stationnaires

Références : [1] - Dictionnaires de physique expérimentale tome 1 et tome 4 nouvelles éditions
[2] - Ouvrages sur les ondes (Soutif, BFR, Pérez électricité, etc...)

Proposition de plan (on ne réalisera pas toutes les expériences)

1. introduction

Lorsqu'il y a superposition d'une onde progressive avec une onde réfléchie, l'onde résultante ne se propage plus, on a un phénomène stationnaire.

Les conditions d'obtention nécessitent donc l'existence d'un obstacle réfléchissant.

Le système stationnaire obtenu dépend de la fréquence des ondes, de la nature du milieu et de la "qualité" de la réflexion (laquelle est liée à la "forme" et la nature de l'obstacle).

Naturellement, en général, il y a des *réflexions multiples* au niveau de l'obstacle et de la source.

⇒ Le milieu (nécessairement limité) dans lequel s'établit des ondes stationnaires est un "oscillateur" possédant des modes propres de vibrations (ces modes sont liés à la nature et la géométrie du milieu). En conséquence, le phénomène stationnaire sera de meilleure "qualité" si on réalise en plus des conditions de *résonance*.

⇒ Dans ce qui suit, on se limite essentiellement aux ondes stationnaires à *une dimension*.

On caractérise le phénomène par la présence de *ventres* et de *nœuds* dans l'amplitude de la variable observée. On "mesure la présence" d'ondes stationnaires par le *taux d'ondes stationnaires* ou TOS défini par :

$$\text{TOS} = \frac{\text{amplitude max}}{\text{amplitude min}}$$

Généralement on connaît la fréquence f des ondes, de la mesure de λ on peut donc en déduire la célérité c de l'onde dans le milieu : $c = \lambda f$

Il est nécessaire d'effectuer un classement pour présenter les expériences. Celui-ci peut s'établir de deux façons :

- 1 - Le type d'ondes : longitudinales, transversales, de torsion...
- 2 - La nature des ondes : mécanique, électromagnétiques.

Inventaire des expériences possibles :

a) Ondes mécaniques

- a) transversales : expérience de Melde (observation, mesure de c) TOS infini
- b) transversales : surface d'un liquide (observation, mesure de c)
- c) de torsion : fil de torsion
- d) longitudinales : le long d'un ressort (observation, mesure de c)

b) Ondes acoustique (longitudinales)

- a) Ondes sonores dans l'air : tuyaux sonores (TOS, adaptation, mesure de c (air))
- b) Ondes sonores dans l'air et dans un métal : tube de Kundt (mesure de c (métal))
- c) Ondes ultrasonores dans l'air (mesure du TOS) ou dans un tuyau
- d) Ondes ultrasonores dans l'eau (observation, mesure de c (eau))

c) Ondes électromagnétiques

- a) Ondes libres ; mesure de λ et du TOS.
- b) Ondes guidées ; mesures de λ et du TOS avec extrémité ouverte, fermée sur court-circuit, fermée sur un cornet.

2. ondes mécaniques

2.1 ondes transversales : expérience de Melde

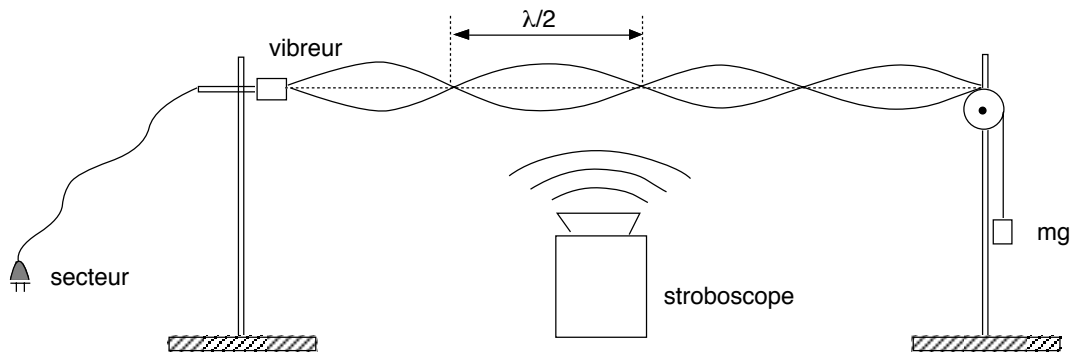
Une corde inextensible de masse linéique μ est tendue horizontalement ($T = mg$). Un vibreur $f = 100$ Hz excite transversalement la corde. La longueur L est réglable.

L'équation de propagation des ondes transversales dans la corde est : $\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{T}{\mu} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$ donc $c = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$

À la résonance on a $L = k \frac{\lambda}{2}$ avec $\lambda = c/f$. L'aspect de la corde (valeurs de k : nombres de fuseaux, ventres, nœuds...)

dépend donc de: L , c et f donc de L , T , μ et f : $k = \frac{2Lf}{c} = 2Lf \sqrt{\frac{\mu}{T}}$ ou encore $\lambda = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{mg}{\mu}}$

A priori, f (vibreur alimenté par le secteur) et μ (on utilise une seule corde) sont fixes. On peut donc agir uniquement sur L et/ou T on a : $k\sqrt{T} = Cte.L$



- On détermine tout d'abord μ par pesée (ordre de grandeur $0,5 \text{ g.m}^{-1}$)
- On montrera la nécessité de la résonance pour obtenir des ondes stationnaires stables.
- On utilisera le stroboscope pour observer les vibrations de la corde.
- On montrera l'influence de L et/ou de T (ou de m)

Par exemple si on fixe k on doit avoir $\frac{L}{\sqrt{T}} = Cte$, donc si on double la longueur, il faut multiplier la tension par 4.

Si on fixe L , alors $k\sqrt{T} = Cte$, si par exemple on multiplie (divise) T par 4, on divise (multiplie) k par 2.

Par exemple il est intéressant de tracer $\lambda = f(\sqrt{m})$ qui est une droite de pente $\frac{1}{f} \sqrt{\frac{g}{\mu}}$

Si on fixe T , alors $k/L = Cte$, si par exemple on double la longueur, on double de nombre de fuseaux.

- Pour une configuration donnée, on mesurera c par la mesure de λ : $c = \lambda f$ que l'on comparera au modèle $\sqrt{T/\mu}$

Ordre de grandeur : $m = 50 \text{ g}$ donc $c = \sqrt{\frac{0,05 \times 9,81}{0,0005}} = 31 \text{ m.s}^{-1}$

2. 2 Influence du mode d'excitation

Exp avec sonomètre et analyseur de spectre (l'expérience est décrite en détail dans le tome 1 mécanique nouvelle édition, elle marche assez bien).

2. 3 ondes longitudinales le long d'un ressort

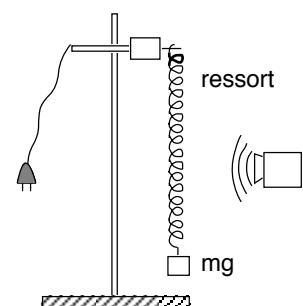
On utilise un long ressort que l'on excite avec le vibreur précédent (fréquence f).

Ce ressort peut simuler un solide à une dimension.

On fera une observation stroboscopique et on mesurera λ .

On fera varier les conditions aux limites (pas de masse, puis \neq masses)

On en déduira $c = \lambda f$ (ordre de grandeur 10 m.s^{-1}).



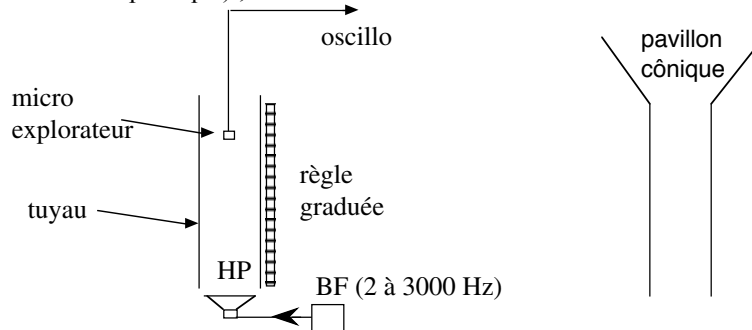
3. ondes acoustiques

3. 1 ondes acoustiques sonores dans les gaz : tuyau sonore

Les ondes sont longitudinales. L'équation de propagation est par exemple (une dimension) $\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{1}{\chi_s \rho} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$ où p est la surpression (on peut utiliser d'autres grandeurs acoustiques telle que le déplacement, la vitesse...), ρ est la masse volumique du fluide, χ_s le coefficient de compressibilité adiabatique.

La célérité est donc $c = \frac{1}{\sqrt{\chi_s \rho}}$ et dans l'hypothèse d'un gaz parfait : $c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$

Exploration du champ de pression dans les ondes stationnaires produites par un tuyau sonore : "le micro explorateur". Le tuyau est ici un "tuyau fermé", fermé au niveau du haut-parleur, ouvert du côté opposé où il y a *a priori* un nœud de pression acoustique (pression atmosphérique) ; le vérifier.



Manipulation :

On choisit une fréquence de l'ordre de 2 à 3000 Hz (à la résonance d'un harmonique).

Mesure de c :

On déplace le micro, entre 2 max (ou 2 min) successifs on a $\lambda/2$ (observation à l'oscillo) ; De cette mesure on pourra en déduire c : $c = \lambda f$ et comparer au modèle

NB : le fondamental (hypothèse du tuyau ouvert) est de l'ordre de $f_0 = c/4\ell = 340/2 \times 1 = 170$ Hz donc en choisissant une fréquence de l'ordre de 2000 Hz on a au moins 5 fuseaux dans le tuyau.

Il est intéressant d'effectuer une mesure pour une fréquence supérieure à la fréquence de coupure $f_c = 0,59c/D$ soit pour un diamètre $D = 5$ cm $f_c \approx 4000$ Hz (prendre par exemple 6000 Hz) \Rightarrow voir le montage « Acoustique ».

Mesure du TOS :

Noter les amplitudes aux nœuds A_m et aux ventres A_M puis déterminer le TOS. $TOS_1 = \frac{A_M}{A_m} =$

Principe de l'adaptation d'impédance :

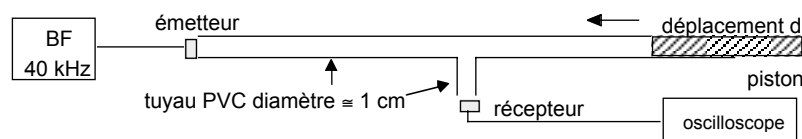
On remplace le tuyau par un tuyau identique mais terminé par un pavillon conique. On effectue les mêmes mesures et on en déduit le nouveau TOS : $TOS_2 =$

Le passage de l'onde dans le milieu extérieur est meilleure dans le second cas donc on doit avoir $TOS_2 < TOS_1$.

NB : ne pas toucher au BF (fréquence, gain) pendant le changement de tuyau.

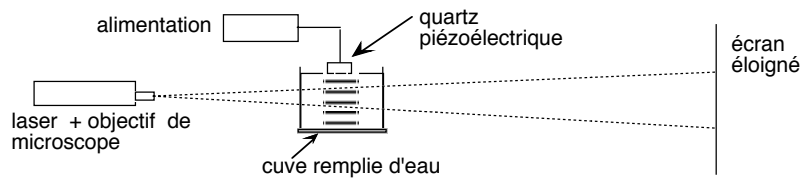
3. 2 ondes acoustiques ultrasonores dans un tuyau

Le montage est schématisé ci-dessous. Lorsqu'on déplace le piston, on change l'accord de la cavité donc la répartition du champ de pression. Entre deux maximums (ou min) de pression successifs on a $d = \lambda/2$.



3. 3 ondes acoustiques ultrasonores dans les liquides

On réalise le montage suivant :



La fréquence des US est connue (notice appareil; ordre de grandeur 800 kHz). On mesure λ sur l'écran (ne pas oublier le grandissement). D'où $c_{\text{eau}} = \lambda f$ (ordre de grandeur 1400 m.s^{-1})

4. ondes électromagnétiques

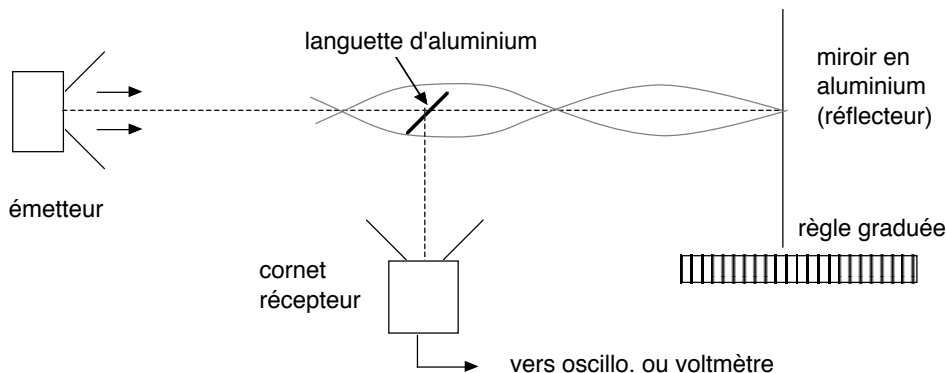
Les équations de Maxwell dans le vide (l'air est assimilable au vide pour ses propriétés électromagnétiques) conduisent à l'équation de propagation (par exemple pour le champ électrique) :

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \text{ soit à une dimension : } \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial x^2} \text{ la célérité est } c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

4. 1 ondes stationnaires "libres"

On réalise le montage :

L'émetteur est constitué d'une diode de Gunn et d'un cornet adaptateur; nous supposons qu'à quelques dizaines de centimètres de celui-ci (la longueur d'onde est de l'ordre de 3 cm), nous avons une onde plane. Le schéma expérimental est :



Un miroir en aluminium perpendiculaire à la direction de propagation permet la réflexion de l'onde incidente, l'onde réfléchie s'ajoute ainsi à l'onde incidente pour établir l'onde stationnaire. Nous admettons (l'expérience le vérifie), qu'il n'y a pas de nouvelle réflexion de l'onde réfléchie sur le cornet émetteur. Une règle graduée permet de repérer la position du miroir. Une languette d'aluminium de 1 cm de largeur environ et inclinée à 45° sur la direction de propagation permet de renvoyer le champ régnant dans l'onde stationnaire vers le cornet récepteur qui se trouve dans une direction perpendiculaire à la direction d'émission de l'onde. On maintient la languette fixe et on déplace le miroir ; on mesure alors le signal donné par la diode réceptrice. Ce signal passe par des valeurs maximales et minimales correspondant aux maxima et minima de l'onde stationnaire. Chaque fois que l'on déplace la plaque de $\frac{\lambda}{2}$ on retrouve le même état dans l'onde stationnaire. On peut ainsi observer plusieurs minima successifs ; en repérant les positions initiale et finale du miroir, on en déduit la longueur d'onde λ .

NB : On comparera la valeur trouvée à celle que l'on obtient à partir de la mesure de la fréquence f (oscilloscope) $\lambda = \frac{c}{f}$ où c est la vitesse de la lumière dans le vide.

4. 2 ondes stationnaires « guidées »

Rappelons que seuls certains modes peuvent se propager dans le guide. L'onde n'a plus la structure de l'onde plane : les champs électrique E et magnétique B ne peuvent être tous deux simultanément orthogonaux à la direction de propagation dans le cas où la cavité ne comporte pas de conducteur intérieur (c'est ce qui est réalisé ici puisqu'on étudie la propagation dans un conducteur creux de section rectangulaire). La grande dimension du rectangle de la section du

guide est notée a et sa petite dimension b. Le mode excité est un mode où le champ électrique E est transversal (Mode TE). Il y a plusieurs modes dont les longueurs d'onde dans le guide sont données par la relation :

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}} \quad \text{où } \lambda_0 \text{ est la longueur d'onde dans le vide } \lambda_0 = c/f, f \text{ étant la fréquence et où } \lambda_c = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \text{ est}$$

la longueur d'onde de coupure qui dépend des deux entiers m et n.

Le mode étudié ici est celui où m = 1 et n = 0. C'est le Mode TE_{1,0} qui est celui de plus grande longueur d'onde de coupure $\lambda_c = 2a$ (rappelons que a est la grande dimension de la section).

REMARQUE

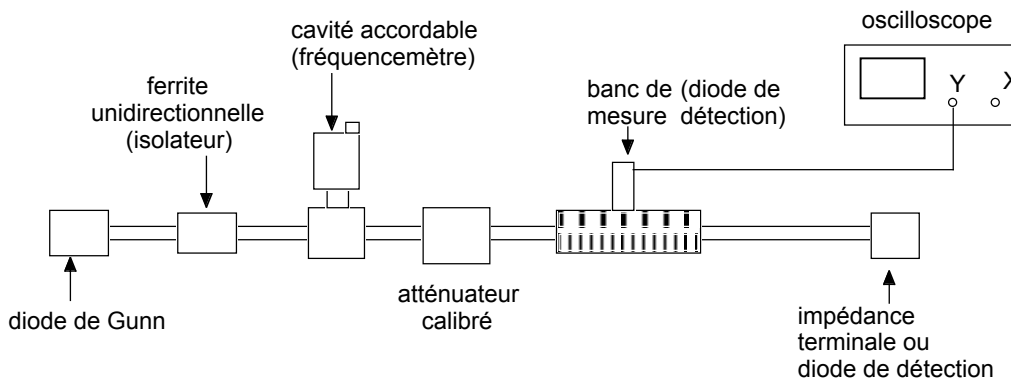
La fréquence f est imposée ainsi que les dimensions du guide ; pour un mode (m,n) donné, le guide se comporte comme un filtre passe-haut et seules peuvent se propager les fréquences supérieures à la fréquence de coupure f_c avec

$$f_c = \frac{1}{2} c \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

La plus petite fréquence de coupure correspond donc au mode (m = 1, n = 0) et vaut $f_c = \frac{c}{2a}$. Si la fréquence f est inférieure à celle du mode (m = 1, n = 1) qui est celui de fréquence de coupure la plus basse en dehors du mode (m = 1, n = 0), aucun des modes autre que (m = 1, n = 0) ne pourra se propager : la géométrie du guide permet de sélectionner ce mode (1,0).

On dispose à la suite de la diode de Gunn et dans l'ordre :

- la ferrite unidirectionnelle (qui évite le retour d'une onde réfléchie)
- la cavité fréquencesmètre
- l'atténuateur calibré
- la ligne de mesure (utile pour la suite)
- on place également en bout de montage une diode de détection.



Mesure de la fréquence

On place la diode de détection en bout de banc, on agit sur le fréquencesmètre (on modifie la géométrie de cette cavité) ; au moment où il y a accord de la cavité avec la fréquence émise par la diode de Gunn on remarque une diminution de l'intensité, on note alors l'indication f₀ du fréquencesmètre.

On dérègle alors le fréquencesmètre, la source reste réglée sur le mode choisi pour toute la durée de la manipulation.

Mesure de la longueur d'onde dans le guide

On place le court-circuit mobile à l'extrémité du banc.

Ce court-circuit provoque l'établissement d'une onde stationnaire pure avec minima nuls, donc aisément localisables. On dispose de deux méthodes de mesure pour déterminer la longueur d'onde guidée λ_g :

a) On peut tout d'abord observer sur l'oscilloscope (en fonction DC), le signal donné par la sonde (une diode de détection) qui se trouve sur la ligne de mesure. On déplace cette sonde de façon à la caler sur un minimum du champ, on poursuit le déplacement de façon à observer le minimum suivant le plus voisin : la distance (mesurable sur le vernier du banc) qui sépare ces deux positions, représente la demi-longueur d'onde $\frac{\lambda_g}{2}$.

On peut obtenir une précision meilleure en mesurant la distance qui sépare plusieurs minima.

b) On peut également maintenir fixe la sonde lorsqu'elle détecte un minimum et déplacer le court-circuit de façon à obtenir un nouveau minimum. La distance que l'on mesure sur le court-circuit représente aussi la demi-longueur d'onde. Dans cette opération on a déplacé "en bloc" l'ensemble des fuseaux de l'onde stationnaire qui ont toujours un minimum nul sur le court-circuit.

– Cette mesure de λ_g étant faite, on évalue l'incertitude $\Delta\lambda_g$ sur λ_g (précision des pointés, lecture des positions...) et on compare cette valeur à la valeur théorique.

NB : pour évaluer λ_c , on mesure la largeur a , du guide et on en déduit $\lambda_c = 2a$.

Mesure de différents TOS

On mesurera le TOS pour le guide ouvert, fermé sur un court-circuit (cf ci-dessus), sur le cornet adaptateur.

Pour mesurer le TOS on utilise l'atténuateur calibré : on repère un min sur l'oscillo, puis étant sur un max on se ramène au niveau d'un min grâce à l'atténuateur :

REMARQUE

Quel que soit le type de production, la détection de l'onde est réalisée par une diode. La mesure du courant de sortie de cette diode soumise au champ électrique alternatif pose un problème d'étalonnage car la caractéristique de la diode n'est pas linéaire. Si on est dans un domaine où la caractéristique peut être approchée par une parabole, domaine dit de détection quadratique, le signal de sortie est proportionnel au carré de l'amplitude du champ électrique, c'est-à-dire à la puissance émise par l'onde. Il n'est toutefois pas toujours facile d'être assuré de ce type de fonctionnement qui n'a lieu que pour de faibles valeurs du champ. Aussi, chaque fois que l'on doit effectuer une mesure quantitative, on essaiera de se ramener à la mesure d'un champ faible (voir le document fourni par le constructeur).

Nous comparerons l'égalité de deux champs ; l'un des deux ayant été affaibli par un atténuateur étalonné : c'est la méthode de l'atténuateur calibré (étalonné en décibels).

Soient deux champs qui en des points M_1 et M_2 dans le guide ont les valeurs E_1 et E_2 (par exemple $E_1 > E_2$) lorsque l'atténuateur calibré est sur la position N_1 dB.

Agissons alors sur l'atténuateur de façon que la diode, placée en M_1 indique la même valeur que ce qu'elle indiquait avant sous l'effet du champ E_2 en M_2 et notons la valeur N_2 dB indiquée par l'atténuateur. On a ainsi multiplié le champ E_1 par un facteur d'atténuation α et l'égalité $E'_1 = \alpha E_1 = E_2$ est réalisée.

L'atténuateur est étalonné de façon à donner les rapports d'affaiblissement en puissance en dB, soit ici :

$$N_2\text{dB} - N_1\text{dB} = -10 \text{Log}_{10} \left(\frac{E'_1}{E_1} \right)^2 = -20 \text{Log}_{10} \frac{E'_1}{E_1} = -20 \text{Log}_{10} (\alpha)$$

Connaissant N_1 et N_2 , on en déduit la valeur de α et par conséquent le rapport des champs. Bien que la précision soit conditionnée par celle de l'atténuateur, on utilise cette méthode pour la mesure des TOS.

Diode de Gunn

Diode à semi-conducteur qui, comme la diode tunnel (diode Esaki), possède sur sa caractéristique une partie où la résistance est négative. Cette résistance négative est utilisée pour entretenir des oscillations électroniques de haute fréquence (GHz).

La diode de Gunn est couramment utilisée comme source d'ondes électromagnétiques centimétriques.

L'effet a été découvert en 1963 par John Battiscombe Gunn.

