

But : On étudie dans cette séance la propagation des ondes le long d'une corde, dans un câble coaxial et des ondes acoustiques dans l'air.

À la fin de cette séance, vous devez être capable :

- de créer un système d'ondes stationnaires et de mesurer ses caractéristiques ;
- de mesurer la célérité des ondes se propageant dans un système physique ;
- d'analyser les effets de conditions aux limites sur la propagation des ondes ;

I - Corde de Melde

La longueur de la corde est variable et on peut faire varier sa tension à l'aide des masses suspendues à l'extrémité. La fréquence d'excitation est également réglable.

En général, l'onde de tension totale n'est ni une onde progressive, ni une onde stationnaire. L'amplitude en fonction de x passe par des maxima et des minima. Dans tous les cas, deux maxima successifs sont distants de $\frac{\lambda}{2}$.

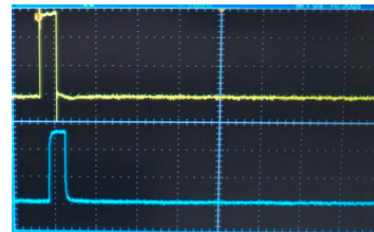
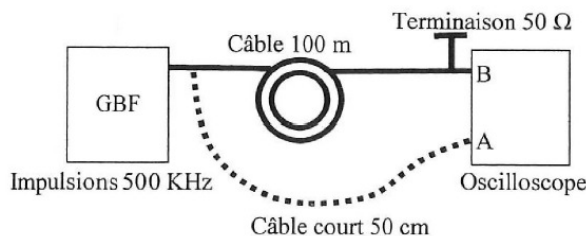
L'existence d'ondes partiellement stationnaires permet de mesurer la longueur d'onde et la vitesse de propagation du signal.

- Agir sur les différents paramètres pour observer la résonance du premier mode de vibration de la corde (mode fondamental).
- Immobiliser la corde à l'aide du stroboscope et en déduire la fréquence d'excitation correspondante f . Comparer avec la mesure du GBF.
- Mesurer la longueur d'onde correspondante.
- Répéter les mesures pour différents modes de résonance.
- Quelles sont les incertitudes de mesure ?
- À l'aide d'une représentation graphique, déterminer la valeur numérique de la célérité des ondes mécaniques le long de la corde.
- Comparer avec la valeur théorique $c_{th} = \sqrt{\frac{T_0}{\mu}}$ avec μ la masse linéique de la corde.

II - Ondes dans un câble coaxial

1) Principe des mesures

On envoie des impulsions courtes de haute fréquence ($f \approx 500$ kHz) à l'entrée d'un long câble coaxial et l'on étudie la propagation de ces impulsions. L'impédance caractéristique du câble vaut 50Ω .



Pour visualiser les différents signaux on utilise un câble coaxial court dont on peut montrer qu'il fournit correctement l'image du signal à l'endroit où il est connecté.

2) Propagation et atténuation

- Utiliser le GBF en signal carré d'amplitude de l'ordre de quelques volts avec un faible rapport cyclique (*duty*).

- Ajuster le décalage en tension pour émettre une impulsion d'amplitude positive.
- Observer les signaux en entrée et en sortie du câble.
- Pourquoi n'observe-t-on pas d'onde réfléchie ?
- En mesurant le retard entre les deux signaux, déterminer la vitesse de propagation du signal le long du câble.
- Comparer la forme des signaux en entrée et en sortie.
- Le modèle idéal du câble est-il suffisant ? La dispersion le long du câble apparaît-elle ?
- On admet que l'amplitude de la tension le long du câble évolue selon une loi exponentielle

$$u_m(x) = u_0 e^{-\alpha x}$$

Déterminer l'atténuation en dB/m (attention à bien prendre $20 \log$) et le coefficient d'atténuation α en m^{-1} de ce câble.

Pour le câble utilisé, les valeurs typiques sont : 1,3 dB/100 m à 1MHz, 4,6 dB/100 m à 10MHz et 17,4 dB/100 m à 100MHz.

3) Réflexion à l'extrémité du câble

a) Impédance terminale infinie

- Enlever la résistance de 50Ω à l'extrémité du câble long. L'impédance terminale est alors celle de l'oscilloscope et une onde réfléchie prend naissance à cette extrémité.
- Quelle est l'impédance de sortie du GBF ? En déduire qu'il n'y a pas de réflexions multiples dans le câble.
- Observer les tensions à l'entrée et à la sortie du grand câble. Identifier le signal émis par le GBF, le signal à l'extrémité et le signal réfléchi qui a effectué un aller retour et revient au niveau du GBF.
- Vérifier l'équidistance des échos successifs.
- Mesurer de nouveau la vitesse de propagation. Vérifier le signe correct du coefficient de réflexion en tension.
- Pourquoi la tension à l'extrémité du câble est-elle doublée ?

b) Impédance terminale nulle

- Placer un petit fil entre l'âme et la masse du té à la sortie du grand câble.
- Effectuer la même étude que ci-dessus en mettant en évidence les différences entre les deux situations.

c) Réflexions multiples

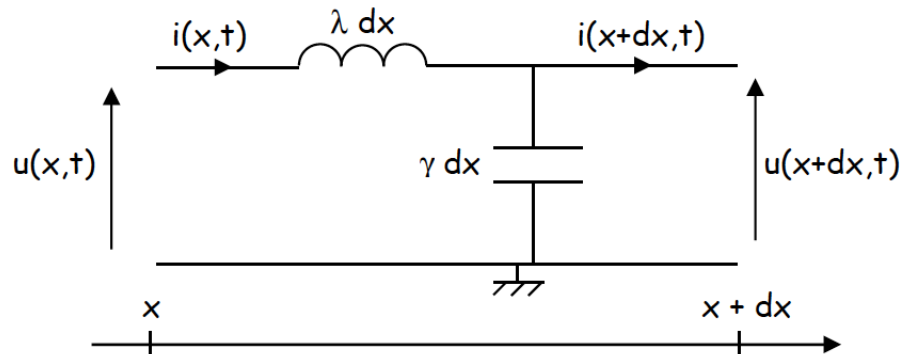
- Modifier légèrement le montage en plaçant le té avec la résistance de 50Ω à l'entrée du long câble, c'est-à-dire immédiatement à la sortie du GBF.
- Le signal de retour sur le câble voit donc comme impédance de sortie l'association parallèle de cette résistance et de celle du GBF. Quelle est la valeur de l'impédance équivalente ?
- En déduire l'existence d'une onde réfléchie à la sortie du GBF.
- Vérifier le signe du coefficient de réflexion à l'entrée du câble.
- En mesurant les amplitudes des différentes impulsions, évaluer la valeur de ce coefficient et comparer aux prévisions théoriques.

III - Mesure de la célérité du son dans l'air et de la position d'un objet

- À l'aide du matériel disponible, proposer un protocole permettant de déterminer la vitesse du son.
- Le mettre en oeuvre.
- Quelles sont les incertitudes liées à cette mesure de célérité ?
- Commenter les résultats obtenus par rapport à la valeur tabulée à 20 °C.
- Proposer un nouveau protocole permettant de déterminer la position d'un objet à partir de la mesure de son écho temporel.
- Le mettre en oeuvre.
- Quelles sont les incertitudes liées à cette mesure de position ? Commenter.

Annexe

→ En l'absence de pertes, on modélise une portion de câble coaxial de longueur dx par une inductance par unité de longueur λ et par une capacité par unité de longueur γ :



Les ondes de tension $u(x,t)$ et de courant $i(x,t)$ vérifient une équation de propagation de D'Alembert. Elles se propagent à la célérité $c = \frac{1}{\sqrt{\gamma\lambda}}$.

→ Si l'on considère une onde plane progressive de tension $u(x \pm ct)$ se propageant le long du câble et l'onde de courant associée $i(x \pm ct)$, le rapport u/i est constant au cours de la propagation.

Ce rapport est égal à l'impédance caractéristique du câble :

$$Z_c = \sqrt{\frac{\lambda}{\gamma}}$$

→ Si le câble est relié à une impédance terminale $\underline{Z}$, une onde réfléchie est engendrée à l'extrémité du câble. Le coefficient de réflexion en amplitude pour la tension s'écrit

$$r_u = \frac{\underline{Z} - Z_c}{\underline{Z} + Z_c}$$

→ Si l'impédance terminale est infinie (coupe-circuit), $r_u = +1$. L'amplitude de l'onde réfléchie est égale à celle de l'onde incidente.

→ Si l'impédance terminale est nulle (court-circuit), $r_u = -1$. L'amplitude de l'onde réfléchie est l'opposé de celle de l'onde incidente.