

Travaux Pratiques de Physique

Semestre 4 — Phénomènes Vibratoires

Étude de la résonance	3
Étude des ondes stationnaires	8
Phénomène de battement appliqué à la détermination de la vitesse de la lumière	15
Étude du câble coaxial	19
Interférences	24

Les séances de travaux pratiques durent trois heures, les TP doivent être préparé pour la séance en

☞ Lisant attentivement et intégralement le texte concernant le TP

☞ Répondant aux questions identifiées par le sigle 

En particulier, les parties introductives concernant les éléments théoriques nécessaires à la compréhension du TP doivent être travaillées.

Pour faciliter le déroulé des séances, le présent texte comporte des instructions (parfois très directives) sur les manipulations à effectuer. Les différentes étapes du travail à effectuer sont identifiées par le sigle  , tandis que les

protocoles détaillés et les mises en garde sont précédés du sigle  .

Les questions sont là pour vous guider dans la démarche expérimentale proposée et ne sont pas à prendre comme un découpage point par point de la réflexion à mener. En aucun cas, vous ne devez appliquer machinalement des protocoles sans en comprendre le sens, le contexte ou l'objectif.

../FIG/Roulette.png

TP 1

Étude de la résonance

Le but de cette séance de travaux pratiques est de vous faire étudier des oscillations libres, plus ou moins amorties et forcées à l'aide d'un ressort vertical puis d'un circuit électrique simple.

On appelle pseudo-période de l'oscillateur la quantité

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}}$$

Partie A Éléments de théorie

A Formulation générale

A-1 Oscillateur harmonique non amorti

Un système décrit par une variable physique x dont l'évolution temporelle est régie par une équation différentielle de la forme

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + \omega_0^2 x(t) = 0 \tag{1}$$

est un oscillateur harmonique.

L'évolution temporelle de la grandeur x est de la forme

$$x(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

L'amplitude A_0 et la phase à l'origine φ sont déterminées par les conditions initiales. La pulsation propre ω_0 est définie par les paramètres du système physique, indépendamment des conditions initiales. La période propre de l'oscillateur est $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$.

A-2 Oscillateur harmonique amorti

En présence d'un mécanisme de dissipation de l'énergie, il y a amortissement de l'oscillation.

Dans un grand nombre de cas, l'amortissement est proportionnel à la vitesse de variation de la grandeur x (on parle de frottements visqueux), il en résulte l'équation différentielle suivante

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + \gamma \frac{dx(t)}{dt} + \omega_0^2 x(t) = 0 \tag{2}$$

Le paramètre γ est le taux d'amortissement. On appelle $\tau = \frac{2}{\gamma}$ le temps d'amortissement.

À partir de ω_0 et γ , on définit un nombre sans dimension $Q = \frac{\omega_0}{\gamma}$ nommé facteur de qualité de l'oscillateur.

En régime oscillatoire ($Q > \frac{1}{2}$), la solution est de la forme

$$x(t) = A_0 e^{-\frac{\gamma}{2}t} \cos\left(\omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}} t + \varphi\right). \tag{3}$$

A-3 Oscillateur harmonique forcé

En présence d'un forçage harmonique, l'équation d'évolution peut s'écrire sous la forme

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + \gamma \frac{dx(t)}{dt} + \omega_0^2 x(t) = \omega_0^2 X_0 \cos(\omega t), \tag{4}$$

où X_0 a la même dimension que la variable x .

En régime permanent (lorsque le terme transitoire devient négligeable) la solution est

$$x(t) = \frac{\omega_0^2 X_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}} \cos(\omega t + \varphi(\omega)). \tag{5}$$

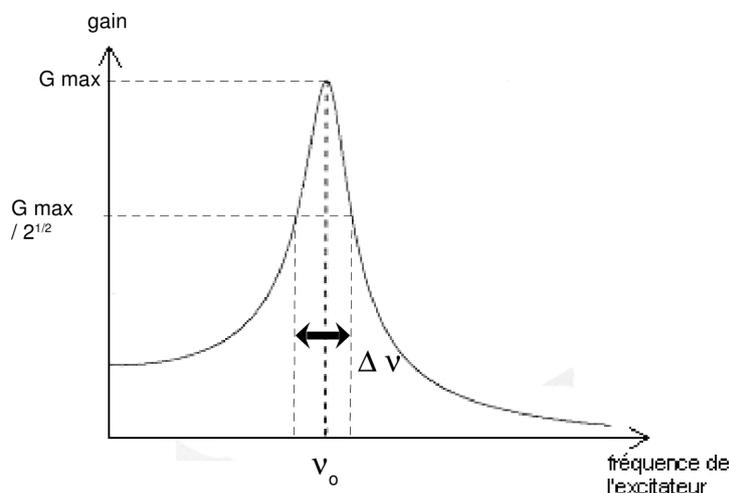


Figure 1: Représentation schématique de la variation du gain d'un oscillateur forcé et amorti en fonction de la fréquence d'excitation.

Le facteur de qualité de l'oscillateur est lié aux fréquences de coupure $Q = \frac{\nu_0}{\Delta \nu_0}$.

La pulsation de résonance est donnée par

$$\omega_R = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}$$

B Applications

B-1 Oscillateur mécanique

On considère un ressort à spires non jointives, de constante de raideur k et de longueur à vide l_0 , suspendu verticalement à un point d'attache mobile A . Une masse m de volume V est accrochée à l'extrémité inférieure. La masse m est immergée dans un fluide de masse volumique ρ (voir figure 3).

Les positions du centre de gravité G de la masse m et du point d'attache A sont repérées le long d'un axe vertical $(0, \vec{e}_z)$ fixe par rapport à un référentiel galiléen.

On note

- z la position du point d'attache M de la masse et au ressort sur l'axe $(0, \vec{e}_z)$
- z_A la position du point A sur l'axe $(0, \vec{e}_z)$

Le bloc de masse m est soumis à l'ensemble des forces suivantes:

- **Poids:** $\vec{P} = m\vec{g}$
- **Force de rappel du ressort (loi de Hooke) :** $\vec{F}_R = -k(\vec{AM} + l_0\vec{e}_z)$
- **Poussée d'Archimède:** $\vec{F}_A = -\rho V \vec{g}$
- **Frottement visqueux:** $\vec{f} = -\Gamma \frac{d\vec{OM}}{dt}$

 Faire un schéma du système mécanique en plaçant les forces.

En vertu du principe fondamental de la dynamique appliqué à la masse m dans le référentiel galiléen de repère $(0, \vec{e}_z)$, l'équation de la dynamique, une fois projetée sur l'axe $(0, \vec{e}_z)$, s'écrit

$$m \frac{d^2 z(t)}{dt^2} = -\Gamma \frac{dz(t)}{dt} - k(z(t) - z_A(t) + l_0) - (m - \rho V)g \quad (6)$$

Si le point d'attache A est immobile ($z_A(t) = z_A^* = C^{te}$) on obtient la position d'équilibre

$$z^* = z_A^* - l_0 - \frac{m - \rho V}{k}g$$

De manière générale, les écarts aux positions d'équilibre sont des variables pertinentes pour la description de la dynamique. On introduit donc les grandeurs

$$x(t) = z(t) - z^* \quad \text{et} \quad x_A(t) = z_A(t) - z_A^*$$

La variable $x(t)$ est la variable pertinente pour la dynamique du ressort; tous calculs effectués, son évolution est régie par l'équation différentielle suivante

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \gamma \frac{dx(t)}{dt} + \omega_0^2 x(t) = \omega_0^2 x_A(t) \quad (7)$$

 Faire les calculs intermédiaires du changement de variable pour passer de l'équation (6) à l'équation générique (7)

 En déduire l'expression des paramètres γ et ω_0 en fonction des paramètres initiaux.

B-2 Oscillateur électrique

On considère un circuit RLC-série composé d'une résistance R , d'une inductance L et d'une capacité C branchées en série avec un générateur de tension variable $U(t)$.

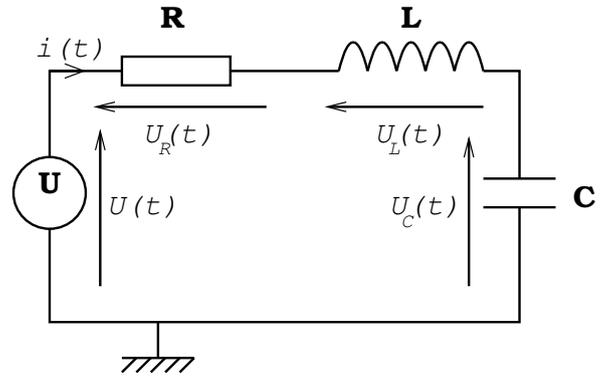


Figure 2: Circuit RLC-Série

En utilisant les notations précisées sur la figure 2, on a les relations suivantes entre les tensions et l'intensité $i(t)$: -

Resistance: $U_R = R i(t)$

Inductance: $U_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}$

Capacité: $i(t) = C \frac{dU_C}{dt}$

En appliquant la loi des mailles, on trouve la relation suivante entre les tensions :

$$U(t) = U_R(t) + U_L(t) + U_C(t).$$

En utilisant la charge $q(t)$ ($i = \frac{dq(t)}{dt}$) comme variable dynamique du circuit, on obtient l'équation différentielle suivante :

$$\frac{1}{L} U(t) = \frac{R}{L} \frac{dq(t)}{dt} + \frac{d^2 q(t)}{dt^2} + \frac{1}{LC} q(t)$$

-  Identifier la pulsation propre et le taux d'amortissement.
-  Justifier par une analyse dimensionnelle le changement de variable $U(t) = \frac{Q(t)}{C}$.
-  Déterminer, en fonction de L et C , l'expression R_c de la résistance induisant un facteur de qualité $Q = \frac{1}{2}$. Justifier la dénomination "résistance critique" donnée à R_c .

Partie B Oscillateurs mécaniques

On étudie dans cette partie les oscillations libres et forcées d'un système mécanique simple.

Le dispositif expérimental est schématiquement représenté sur la figure 3.

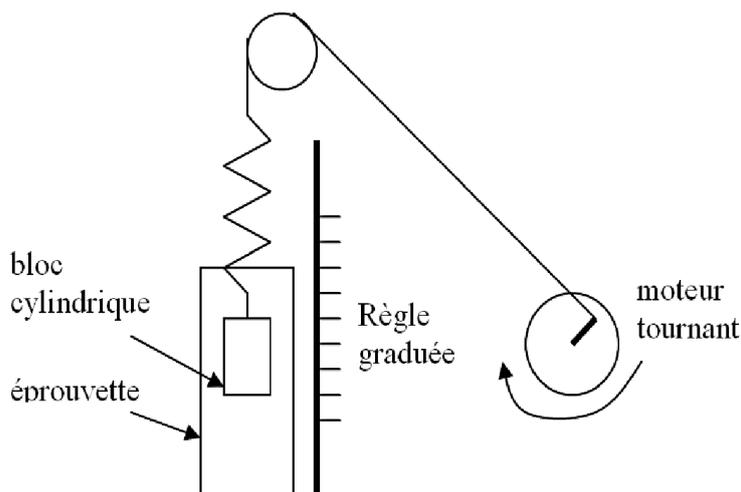


Figure 3: Oscillateur mécanique forcé.

Un bloc cylindrique de **masse** $m = 117 \text{ g}$ est suspendu à l'extrémité d'un ressort relié à un fil. Ce fil passe par une poulie tournant autour d'un roulement à billes. Le fil est finalement attaché en un point excentré par rapport à l'axe de rotation d'un moteur tournant à une vitesse angulaire que vous pouvez régler à l'aide d'un potentiomètre. La vitesse de rotation de la poulie solidaire du moteur est mesurée à l'aide d'un capteur optique qui compte le nombre de tours effectués par la poulie pendant un temps déterminé.

La vitesse minimum de rotation est d'environ 20 tours en 60 secondes, la vitesse maximum est d'environ 200 tours en 60 secondes ce qui permettra d'explorer une **plage de fréquences de forçage comprises entre 0,3 et 3 Hz**.

Vous pourrez mesurer l'amplitude des oscillations grâce à une règle graduée placée face au bloc.

A Mesure préliminaire

Afin d'éviter les problèmes liés aux frottements fluides dans l'air, la pulsation propre de l'oscillateur sera déterminée de façon statique en déterminant la constante de raideur du ressort.

- ☞ Suspendre la masse $m = 117 \text{ g}$ à l'extrémité du ressort (dans l'air) et mesurer précisément l'allongement Δl de celui-ci.
- ☞ En déduire la raideur k du ressort, sa pulsation propre ω_0 ainsi que sa période propre T_0 .

B Oscillations libres

On étudie dans un premier temps les oscillations libres du bloc de masse m .

B-1 Mesures dans l'air

☞ Protocole : Afin de déterminer le taux d'amortissement γ des oscillations dans l'air, écartez le bloc de sa position d'équilibre d'une distance A_0 (suffisamment grande mais en veillant à ce que le ressort reste en tension lorsque la masse est à son altitude maximale). Lâchez le bloc sans vitesse initiale et déclenchez simultanément le chronomètre.

- ☞ Mesurer le temps d'amortissement τ défini comme le temps nécessaire pour que l'amplitude crête à crête des oscillations passe de $2A_0$ à $2A_0e^{-1}$.
- ☞ En déduire le taux d'amortissement γ .
- ☞ Que vaut le facteur de qualité Q de l'oscillateur? En déduire la pseudo-période T et la comparer à la période propre T_0 .
- ☞ Sans faire de mesure, observer rapidement la réponse de l'oscillateur au forçage imposé par le moteur en recherchant notamment la résonance.

B-2 Mesures dans l'eau

On s'intéresse maintenant aux oscillations du bloc immergé dans une éprouvette remplie d'eau. Compte tenu de la poussée d'Archimède, **la masse apparente du bloc n'est plus que de 70 g**.

- ☞ En déduire les nouvelles pulsations propres et périodes propres de l'oscillateur.

☞ Protocole : L'amortissement est à présent trop important pour utiliser la procédure suivie dans l'air. Écartez le bloc de la position d'équilibre en tirant brutalement sur le ressort.

- ☞ Déterminer la pseudo-période des oscillations amorties du bloc dans l'eau. Faire au moins deux fois cette mesure afin d'avoir une bonne estimation de la pseudo-période.
- ☞ Comparer la pseudo-période à la période propre, en déduire le facteur de qualité de l'oscillateur puis le taux d'amortissement.

C Oscillations forcées (régime permanent sinusoïdal)

On soumet maintenant l'oscillateur constitué du bloc immergé dans l'eau à un forçage sinusoïdal.

C-1 Questions préliminaires

- ☞ Quel est l'ordre de grandeur du temps nécessaire à l'apparition du régime permanent sinusoïdal lorsque le bloc est immergé dans l'eau ?

- ☞ Comparez le à celui que vous auriez eu si le bloc oscillait dans l'air.

C-2 Manipulations

- ☞ Mesure préalable : mesurer l'amplitude du point d'ancrage imposée par le moteur (décrocher la masse m et travailler à faible vitesse de rotation du moteur).
- ☞ Tracer sur papier millimétré la courbe théorique représentant l'amplitude des oscillations du bloc en fonction de la fréquence de forçage sur une plage allant de 0.3 à 3 Hz.
- ☞ Mesurer l'amplitude des oscillations du bloc pour une quinzaine de fréquences de forçage s'étalant sur toute la plage disponible (une précision de l'ordre de quelques millimètres sur la mesure de l'amplitude est suffisante).
- ☞ Reporter vos résultats dans un tableau de la forme du Tab. 2
- ☞ Reporter vos points expérimentaux sur le graphe théorique précédemment tracé.
- ☞ Discuter de l'accord entre résultats théoriques et expérimentaux.

Nombre de tours du moteur en 60 secondes			...
Fréquence du forçage (Hz)			...
Amplitude des oscillations (cm)			...

Table 2: tableau de mesures

☞ Protocole : *Modifier le système en fixant un disque à l'extrémité inférieure du cylindre. On supposera le disque de masse négligeable.*

- ☞ Mesurer l'amplitude des oscillations du bloc pour une quinzaine de fréquences de forçage s'étalant sur toute la plage spectrale disponible
- ☞ reporter les points expérimentaux sur le graphe théorique précédemment tracé.
- ☞ Quelle est la différence marquante entre cet oscillateur et celui précédemment étudié? Proposer une explication.

Partie C Oscillateurs électriques

On rappelle que, dans un circuit RLC-série, l'étude de la charge d'un condensateur est identique à celle de la position d'un oscillateur mécanique. En pratique on observera à l'oscilloscope

la tension aux bornes du condensateur qui est proportionnelle à la charge portée par celui-ci: $U_c(t) = \frac{q(t)}{C}$.

Manipulations

Vous disposez de plaquettes comprenant un condensateur en série avec une inductance.

- ☞ Grâce aux valeurs de capacité et d'inductance indiquées sur votre plaquette, calculer les valeurs théoriques de la résistance critique R_c et de la fréquence propre ν_0 du circuit.

☞ Montage : *Réaliser le montage du circuit RLC série permettant d'observer en voie 1 la tension d'alimentation et en voie 2 la tension aux bornes du condensateur (Fig. 4). Durant tout le TP, la résistance variable ne devra jamais être inférieure à 5Ω*

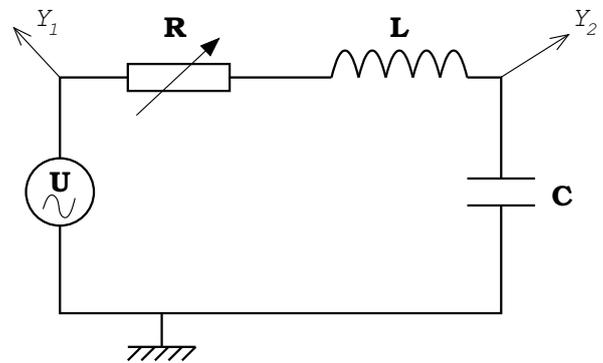


Figure 4: Circuit RLC-série.

A Étude du régime transitoire

On étudie dans cette partie la façon dont le circuit réagit suite à un changement brutal de la tension d'alimentation. Alimenter le circuit avec une tension crête-à-crête $U_o = 0,5 V_{pp}$ de fréquence égale à 50 Hz.

A-1 Observations des différents régimes transitoires

- ☞ Faire varier la résistance du circuit ($R \geq 5\Omega$) afin d'observer les différents régimes correspondant à des amortissements plus ou moins importants: régimes apériodique, critique et pseudo-périodique.
- ☞ Faire un schéma des tensions observées lors des trois régimes en indiquant les valeurs de résistance utilisées ainsi que les zones correspondant au régime transitoire et au régime permanent.
- ☞ Comparer votre valeur expérimentale de la résistance critique à la valeur théorique.

A-2 Etude du régime pseudo-périodique

- ☞ Régler la résistance variable à $5\ \Omega$. Mesurer précisément le temps d'amortissement τ , défini comme le temps mis par les oscillations pour passer de l'amplitude U_0 à $U_0 e^{-1}$. En déduire le taux d'amortissement du circuit γ ainsi que le facteur de qualité Q .
- ☞ La fréquence de résonance du circuit sera-t-elle en théorie très différente de sa fréquence propre ?

B Étude du régime permanent sinusoïdal (oscillations forcées).

On étudie dans cette partie la réponse du circuit au forçage imposé par la tension d'alimentation.

 **Protocole :** Conserver la valeur de la résistance variable égale à $5\ \Omega$ et alimenter le circuit avec une tension sinusoïdale $U_0 = 0,5V_{pp}$.

- ☞ Déterminer rapidement la valeur du gain (rapport de l'amplitude de la tension de sortie sur l'amplitude de la tension d'entrée) à basse puis à très haute fréquence.
- ☞ Rechercher la fréquence permettant d'obtenir le gain maximal. Déterminer les fréquences de coupure et en déduire le facteur de qualité Q du circuit. Comparer à la valeur déterminée précédemment.
- ☞ Tracer la courbe du gain en fonction de la fréquence d'excitation sur une plage de fréquences allant de 50 kHz à 10 kHz
- ☞ Régler la résistance variable à $505\ \Omega$, tracer sur la même figure qu'auparavant la nouvelle courbe du gain et conclure.

TP 2

Étude des ondes stationnaires

Partie A Éléments de modélisation

A Ondes Progressives et Ondes Stationnaires: Généralités

A-1 L'équation d'onde

En 1747, le physicien français Jean le Rond d'Alembert obtient une équation différentielle, l'équation d'onde (ou équation de d'Alembert) dont la solution est une fonction d'onde (onde voyageant dans un milieu à vitesse v).

$$\frac{d^2\Psi(x, t)}{dt^2} = v^2 \frac{d^2\Psi(x, t)}{dx^2} \quad (1)$$

avec

- Ψ : Perturbation d'une grandeur physique par rapport à l'état d'équilibre
- x : coordonnée selon l'axe (O, \vec{e}_x) d'un milieu (m)
- t : Temps (s)
- v : Vitesse de propagation de l'onde selon l'axe x (m/s)

A-2 La fonction d'onde

La fonction d'onde est la solution à l'équation d'onde (1). Lorsque le milieu est infini, la base de l'espace des solutions est composée d'ondes progressives sinusoïdales:

$$\Psi_{\pm}(x, t) = A \sin\left(\omega\left(t \mp \frac{x}{v}\right) + \varphi\right) = A \sin(\omega t \mp kx + \varphi)$$

avec

- A : Amplitude de l'onde (même unité que y)
- ω : Pulsation du mouvement harmonique (rad/s)
- φ : Phase à l'origine ($x = 0$ et $t = 0$)
- $k = \frac{\omega}{v}$: Nombre d'onde (rad/m)
- $T = \frac{2\pi}{\omega}$: Période de vibration (s)
- $\lambda = vT = \frac{2\pi}{k}$: Longueur d'onde (m)

Par convention on choisit ω et k positifs.

La solution Ψ_+ se propage dans la direction des x croissants tandis que la solution Ψ_- se propage dans la direction des x décroissants.

Vérifier que les formes Ψ_+ et Ψ_- sont solutions de l'équation d'onde (1) pour toutes les valeurs de ω et k telles que $\frac{\omega}{k} = v$.

A-3 Corde Vibrante

On considère une corde de masse linéique μ , tendue horizontale au repos par une force de norme T . On néglige les pertes d'énergie de l'onde dans le milieu et le système est supposé homogène, isotrope et non dispersif (la vitesse de l'onde sera donc indépendante de la longueur d'onde).

En isolant une petite tranche de corde et appliquant les loi de la mécanique classique, on montre que la déformation transversale de la corde suit une équation de d'Alembert dans la limite de la reponse linéaire (faible déformation). La vitesse de propagation de l'onde dépend des paramètres physiques de la manière suivante:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (2)$$

A-4 Tube de Kundt

Un certain nombre d'hypothèses simplificatrices sont à considérer lors de l'étude de la propagation d'une onde acoustique :

1. L'état d'un fluide est entièrement défini par trois grandeurs (si l'on néglige les phénomènes de viscosité) : sa pression, son volume (ou sa masse) spécifique et sa température. La matière est considérée comme un milieu continu.
2. Les parois du tube sont supposées rigides et non conductrices de la chaleur. L'existence de parois élastiques ou conductrices apporte un facteur d'atténuation supplémentaire par transfert à la paroi de l'énergie de vibration et provoque une distorsion du front d'onde.
3. Les effets de friction interne au sein du gaz (air) qui emplit le tuyau sont négligés. Les frottements (faibles) sont considérés comme restant localisés sur les parois.

Le tube de Kundt est un tube très long avec de faibles dimensions transverses. Comme la pression y est constante en amplitude et en phase dans le plan transverse $x = C^{te}$, on est ramené à étudier un problème à une dimension. La source sonore

(haut-parleur) est un piston mobile, provoquant compressions et dilatations du fluide. La perturbation créée par le piston va s'éloigner en se propageant de proche en proche par action des couches d'air sur leurs voisines, de sorte que toutes les parties du fluide subiront un déplacement.

Le déplacement U d'une tranche d'air (front d'onde) à la position x et à la date t suit une équation de d'Alembert dans la limite de la réponse linéaire (faible déplacement). Dans l'équation de d'Alembert, v caractérise la vitesse de propagation des ondes sonores dans le fluide (et non celle du fluide $u = \frac{\partial U}{\partial t}$ qui reste au repos en moyenne). Elle est indépendante de la fréquence de l'onde. La vitesse v dépend de deux paramètres caractéristiques de l'inertie (ρ : masse volumique) et de l'élasticité (χ : coefficient de compressibilité adiabatique) du milieu :

$$v = \sqrt{\frac{1}{\chi\rho}} \quad \text{avec} \quad \chi = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_Q. \quad (3)$$

L'expérience montre en effet qu'un ébranlement acoustique se propage de manière adiabatique et non pas isotherme, les échanges de chaleur aboutissant à l'équilibre de température n'ayant pas le temps de s'opérer aux échelles de temps qui caractérisent les successions de compressions et de détentes de l'ébranlement.

Si on assimile l'air à un gaz parfait, la relation (3) conduit à

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad \text{où} \quad \gamma = \frac{C_P}{C_v}. \quad (4)$$

Dans l'air, à 0°C, $\gamma = 1,402$, $\rho = 1,293 \text{ kg.m}^{-3}$, la vitesse du son est égale à 331,6 m.s⁻¹ (et 340 m.s⁻¹ à 20°C).

B Réflexion des ondes

B-1 Superposition linéaire

Lorsque plusieurs ondes voyagent à un même endroit dans un milieu, le milieu réagit simultanément à la présence des ondes en additionnant leur comportement. L'action d'additionner et de soustraire des ondes porte le nom de superposition.

Il est important de réaliser qu'il n'y a pas de transfert d'énergie entre les ondes lors d'un contact. Les ondes continuent leur trajectoire et le milieu réagit à toutes les perturbations venant de chaque onde. Cette règle s'applique seulement si le milieu est élastique et peut localiser toute l'énergie des ondes à l'endroit où se produit la superposition (par ex. : corde élastique).

B-2 Changement de milieu de propagation

Lorsqu'une onde voyageant dans un milieu rencontre un milieu différent, il se produit deux situations à l'interface :

1. **Transmission** : l'onde continue son déplacement dans le nouveau milieu.
2. **Réflexion** : l'onde change de direction et continue son déplacement dans son milieu d'origine.

Voici quelques caractéristiques des ondes réfléchies et transmises :

- Une onde réfléchie et transmise conserve sa fréquence f (ou période T) d'origine, car la fréquence est une caractéristique de l'oscillateur ayant produit l'onde et non du milieu où celle-ci se propage.
- Une onde réfléchie conserve sa longueur d'onde λ et une onde transmise possède une longueur d'onde λ différente causée par le changement de milieu



Consulter l'applet suivant pour vous familiariser avec les notions de réflexion dure et molle: <http://tfleisch.profweb.ca/types-de-reacuteflexion.html>

B-3 Réflexion dure

Une réflexion dure se produit lorsqu'une onde voyageant dans un milieu rencontre un nouveau milieu dans lequel la vitesse de propagation est inférieure.

Lors d'une réflexion dure, le point à l'interface des deux milieux est contraint à demeurer fixe à $y = 0$ en tout temps. Par le principe de superposition linéaire, la conséquence de la réflexion est de créer une nouvelle onde voyageant dans le sens contraire avec une inversion par rapport à l'axe de transmission. Le milieu épousera la forme de l'addition des deux ondes à tout instant.

Mathématiquement, on peut exprimer une onde réfléchie avec inversion à l'aide de l'équation de l'onde incidente. Il suffit d'ajouter un déphasage de π à l'onde incidente et d'inverser le signe de ω , ce qui nous donne l'équation de l'onde réfléchie. Par exemple si l'onde incidente s'écrit $\Psi_i = A \sin(\omega t - kx + \phi)$, l'onde réfléchie prend la forme $\Psi_r = A \sin(-\omega t - kx + \phi + \pi)$

B-4 Réflexion molle

Une réflexion molle se produit lorsqu'une onde voyageant dans un milieu rencontre un nouveau milieu dans lequel la vitesse de propagation est supérieure.

La conséquence de la réflexion molle est de créer une nouvelle onde voyageant dans le sens contraire sans inversion par rapport à l'axe de transmission.

Mathématiquement, on peut exprimer une onde réfléchie sans inversion à l'aide de l'équation de l'onde incidente. Il suffit d'inverser le signe de ω , ce qui nous donne l'équation de l'onde réfléchie. Par exemple si l'onde incidente s'écrit $\Psi_i = A \sin(\omega t - kx + \phi)$, l'onde réfléchie prend la forme $\Psi_r = A \sin(-\omega t - kx + \phi)$

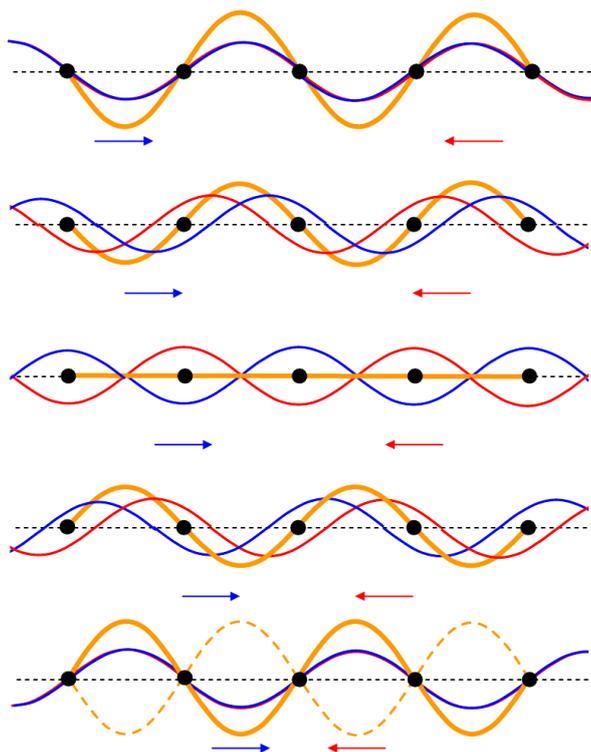


Figure 1: Superposition de deux ondes progressives contrapropageantes de même fréquence.

C Ondes stationnaires

C-1 Définition

Une onde stationnaire est le nom que porte l'addition de deux ondes de fréquence identique se propageant dans un milieu dans des directions différentes. Le résultat de l'addition produit une onde immobile (onde qui ne se propage pas vers la gauche ni vers la droite) dans le milieu (Fig. 1). Le milieu vibre alors de façon stationnaire, d'où le nom *onde stationnaire*.

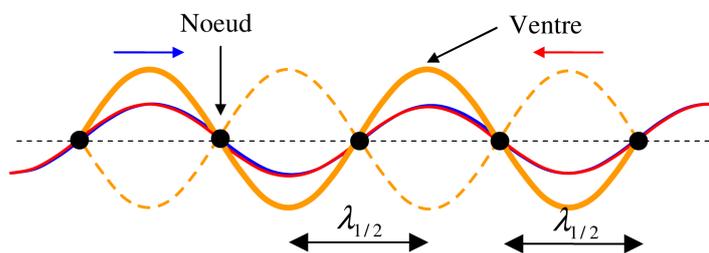


Figure 2: Caractéristiques d'une onde stationnaire.

C-2 Caractéristiques d'une onde stationnaire

Une onde stationnaire se caractérise par les éléments suivants, schématiquement représentés sur la figure 2 :

- **Ventre** : Endroit où l'amplitude de l'oscillation du milieu est maximale.

- **Noeud** : Endroit où l'amplitude de l'oscillation du milieu est nulle.
- **Vitesse dans le milieu** (v) : Vitesse des ondes progressives produisant l'onde stationnaire.
- **Période** (T) : Temps pour effectuer un cycle complet.
- **Demi-longueur d'onde** ($\lambda_{1/2} = \frac{\lambda}{2}$) : Distance entre deux noeuds ou deux ventres consécutifs.

C-3 Onde stationnaire par réflexion

Corde vibrante

À l'aide d'un oscillateur, il est possible de créer une onde stationnaire sur une corde tendue. On attache une extrémité de la corde à l'oscillateur et l'autre extrémité à une interface (mur ou anneau). L'onde se propageant vers la droite sera l'onde produite par l'oscillateur et l'onde se propageant vers la gauche sera l'onde réfléchi par l'interface.

Lorsqu'une corde stimulée par un oscillateur est attachée à un mur, il se produit beaucoup de superpositions d'ondes stationnaires, car les ondes ayant subi une réflexion dure sur le mur subissent à nouveau une réflexion dure sur l'oscillateur (on suppose que l'amplitude de l'oscillateur est faible). Le décalage entre toutes ces ondes stationnaires dépend de la longueur de la corde.

Lorsque la corde possède une longueur qui est un multiple de $\frac{\lambda}{2}$, la corde vibre dans un mode stationnaire unique et l'amplitude peut augmenter beaucoup plus que l'amplitude de l'oscillateur, car il y a de la superposition constructive entre toutes les ondes stationnaires. L'amplitude maximale de la vibration de la corde dépend de l'élasticité de la corde et du rythme de perte d'énergie par frottement dans la corde.

Nous pouvons établir la relation suivante entre la longueur de la corde L , le nombre de ventres N et la fréquence de l'oscillateur f_N . Le mode d'oscillation N de la corde est déterminé par le nombre de ventres observés dans l'onde stationnaire :

$$L = N \frac{\lambda}{2} \Rightarrow f_N = N \frac{v}{2L}$$

Lorsque la corde possède une longueur quelconque, les ondes stationnaires sont décalées entre elles, ce qui produit de la superposition destructive partielle. La corde aura donc une amplitude comparable à l'amplitude de l'oscillateur.

Tuyau

Il est possible de produire des ondes stationnaires dans un tuyau grâce aux molécules d'air qui transportent les ondes sonores longitudinales. Lorsqu'une onde atteint une des extrémités du tuyau, elle peut entrer en contact avec une surface fermée ou une section ouverte. La réflexion de l'onde due à un changement d'interface respecte les règles suivantes :

1. Section fermée \Rightarrow Réflexion dure (avec inversion)
2. Section ouverte \Rightarrow Réflexion molle (sans inversion)

Pour décrire une onde sonore, on peut utiliser deux variables: la pression ou le déplacement. Le déplacement $U(x, t)$ et la pression acoustique p sont déphasés d'un quart de longueur d'onde.

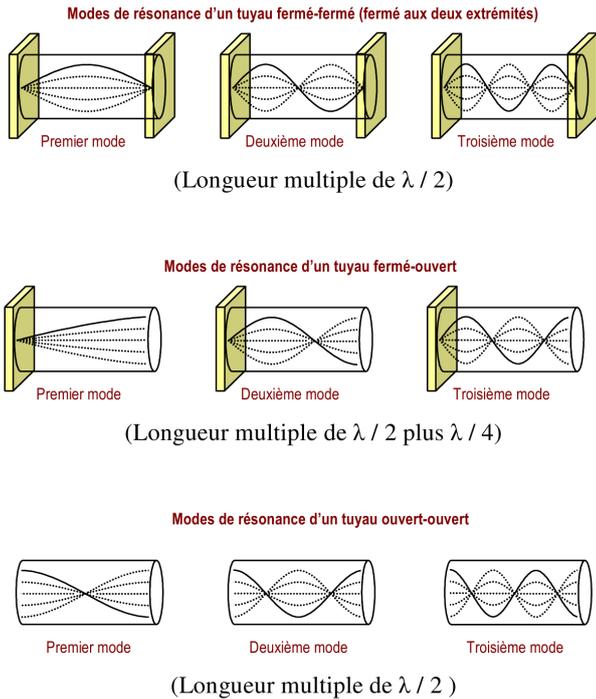


Figure 3: Onde stationnaire dans un tuyau. La figure représente schématiquement les ondes de déplacement.

Cela signifie qu'en tout point et à tout instant où le déplacement est maximal, la pression acoustique est nulle, et inversement.

On appelle ventres de pression les points pour lesquels la pression acoustique est maximale et nœuds de pression ceux pour lesquels elle est nulle. Lors de l'étude d'une onde sonore stationnaire dans un milieu, les nœuds de pression coïncident toujours avec les ventres de déplacement et vice-versa.

C-4 Résonance

La résonance est l'excitation d'un système avec une fréquence égale à la fréquence naturelle d'oscillation du système. Lorsqu'un système possède plusieurs fréquences naturelles (ex. : corde, tuyau), on identifie à chaque fréquence naturelle (valeur propre) un mode d'oscillation (mode propre). Lorsqu'un système entre en résonance, l'amplitude associée au mouvement du milieu est amplifiée. L'amplitude atteindra une valeur maximale lorsque le rythme – auquel l'apport en énergie est donné au milieu – est égal au rythme auquel le milieu dissipe son énergie (ex : frottement, dégagement de chaleur).

C-5 Stroboscopie

C'est l'observation à intervalles de temps réguliers T_e et pendant un temps τ court $\tau \ll T_e$ d'un phénomène périodique rapide.

Si on observe un disque noir avec un secteur blanc monté sur l'axe principal d'un moteur de période T :

1. Quand $T_e = T$, on observe un seul secteur blanc immobile.
2. Quand $T_e = nT$, (n entier >1) on observe aussi un seul secteur blanc immobile, mais on n'observe en fait le mouvement que toutes les n périodes.

3. Quand $kT_e = T$ (k entier >1), on observe k secteurs blancs immobiles.
4. Quand $T_e \simeq T$ on observe un secteur blanc tournant doucement (à la fréquence $|\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T}|$ dans le même sens que le disque si $T_e > T$ et dans le sens contraire si $T_e < T$).

Longueur multiple de $\lambda / 2$				
Situation	Équation	Mode 1	Mode 2	Mode 3
Corde fixée à un mur	$L = N \frac{\lambda}{2}$ $f_N = N \frac{v}{2L}$ $N \in \mathbb{N}$, ($N^{\text{ième}}$ mode d'oscillation)			
Tuyau fermé-fermé				
Tuyau ouvert-ouvert				
Longueur multiple de $\lambda / 2$ plus $\lambda / 4$				
Situation	Équation	Mode 1	Mode 2	Mode 3
Corde fixée à un anneau	$L = (N - 1) \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{4}$ $f_N = \left(N - \frac{1}{2}\right) \frac{v}{2L}$ $N \in \mathbb{N}$, ($N^{\text{ième}}$ mode d'oscillation)			
Tuyau fermé-ouvert				

Figure 4: Condition de résonance.

Partie B Corde de Melde

 Consulter la vidéo sur le lien suivant:
<https://www.youtube.com/watch?v=4BoeATJk7dg?>

A Introduction

On s'intéresse dans cette partie à l'étude de la vibration d'une corde. La mise en vibration d'une corde peut s'effectuer de multiples manières : par pincement (harpe), par percussion (piano), par frottement (violon), par vibreur électrique... D'autre part, les vibrations peuvent être transversales, longitudinales ou de torsion.

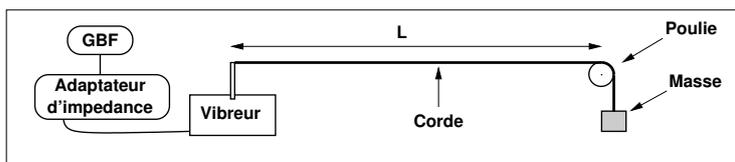


Figure 5: Schéma du dispositif expérimental utilisé

Nous allons limiter notre étude à un système appelé *corde de Melde* (Fig. 5) qui est constitué d'une corde tendue dont une extrémité est fixe tandis que la seconde est fixée à un vibreur électriquement entretenu qui communique en ce point de la corde un mouvement sinusoïdal, transverse, de fréquence F . On se propose d'étudier les ondes transversales générées par un tel dispositif.

Mise en place :

- Réalisez le montage de la figure 5 avec une longueur de corde L de 1 m tendue par une masse de 75 g.
- Le GBF éteint, sélectionnez le mode sinusoïdal, enfoncez le bouton associé à la gamme 10 des fréquences ainsi qu'un des 2 boutons d'atténuations du signal.
- Enfin, assurez-vous que l'amplitude du GBF est réglée au minimum.
- Allumez l'adaptateur d'impédance puis le GBF. Réglez ensuite l'amplitude du GBF de façon à obtenir une tension efficace de 1V sur la sortie de contrôle de l'adaptateur d'impédance.

B Premières observations expérimentales

B-1 Observation du phénomène de résonance

-  Faire varier la fréquence F du GBF entre 1 et 65 Hz (sans modifier son amplitude !) et décrire vos observations.
-  Expliquer ce phénomène en termes d'ondes progressives, d'ondes stationnaires, de fréquences propres de l'oscillateur¹.

B-2 Étude stroboscopique de la vibration de la corde

On prendra tout d'abord soin de se placer dans des conditions qui permettent d'observer une résonance du système avec 2 fuseaux.

-  Régler la fréquence du stroboscope (affichée en coups par minute) pour observer une immobilité apparente de la corde. Que peut-on en déduire sur la fréquence de vibration de chaque point de la corde ?
-  Régler ensuite le stroboscope pour observer le mouvement de la corde vibrante au ralenti. Représenter schématiquement vos observations².
-  Indiquer quelles sont les relations de phase entre les différents points de la corde. Quelle est la relation entre la longueur d'onde de l'oscillation de la corde et la longueur d'un fuseau ?
-  Comparer l'amplitude de vibration du vibreur par rapport à l'amplitude des ventres. Comment expliquez-vous votre observation ?

C Étude quantitative

C-1 Mesure de la longueur d'onde

On utilise une longueur de corde fixée ($L = 1$ m).

-  Ajuster la fréquence du vibreur pour obtenir un unique fuseau bien net³.
-  En déduire la longueur d'onde et la vitesse de propagation de l'onde sur la corde.

C-2 Détermination de la vitesse de propagation des ondes sur la corde.

-  Recommencer l'expérience précédente pour obtenir successivement 2, 3 et 4 fuseaux bien nets.
-  Représenter graphiquement l'évolution de la longueur d'onde en fonction de l'inverse de la fréquence à l'aide des 4 mesures précédentes.
-  Comment pouvez-vous déduire de cette courbe la vitesse de propagation ? Cette vitesse semble-t-elle dépendre de la longueur d'onde ?
-  Comparer la valeur expérimentale de la vitesse avec celle que l'on peut calculer d'après la théorie. On donne la masse linéique de la corde non tendue : 1,25g/m.

1. On pourra, pour simplifier, considérer que les deux extrémités de la corde sont fixes (malgré la présence du vibreur).

2. on pourra tracer sur une même représentation la corde à un instant donné ainsi que les positions extrêmes atteintes par chaque point de la corde vibrante.

3. L'utilisation du stroboscope n'est pas nécessaire

C-3 Influence de la longueur de la corde.

☞ Sans modifier la fréquence du vibreur fixée précédemment, repérer les longueurs de corde qui permettent d’observer 3 puis 2 fuseaux. Commenter les résultats.

Partie C Tube de Kundt

Ce TP porte sur l’étude de phénomènes (propagation d’ondes sonores, résonance) se produisant dans un tuyau rectiligne de dimensions finies et de section constante (tube de Kundt). De tels tubes entrent dans la composition de nombreux systèmes de conduction du son (instruments de musique par exemple). Les lois qui y régissent la propagation du son sont donc essentielles pour la résolution de nombreux problèmes pratiques en acoustique.

✎ Consulter la vidéo sur le lien suivant : https://www.youtube.com/watch?v=qUiB_zd9M0k?

A Dispositif expérimental

Vous disposez :

- ✓ d’un tube de Kundt (tube cylindrique en plastique de longueur 1 m muni d’une échelle graduée)
- ✓ d’un piston mobile
- ✓ d’un haut-parleur
- ✓ d’un générateur basses fréquences (GBF)
- ✓ d’un adaptateur d’impédance
- ✓ d’un microphone fixé dans un tube PVC pouvant être translaté à l’intérieur du tube
- ✓ d’un oscilloscope

⚠ Conseils d’utilisation du GBF :

- **avant toute action sur la molette, vérifier systématiquement quelle fonction est activée (fréquence ou amplitude)**
- **le microphone est très sensible aux variations de pression à l’intérieur du tube. Ne jamais dépasser une amplitude crête à crête de 100 mV. Le microphone risquerait d’en souffrir !**

⚠ Mise en place :

Réaliser ou vérifier le montage de la figure 6 après s’être assuré que tous les appareils sont éteints. Puis, mettre en marche le dispositif en respectant la procédure suivante:

1. allumer l’adaptateur d’impédance du haut-parleur

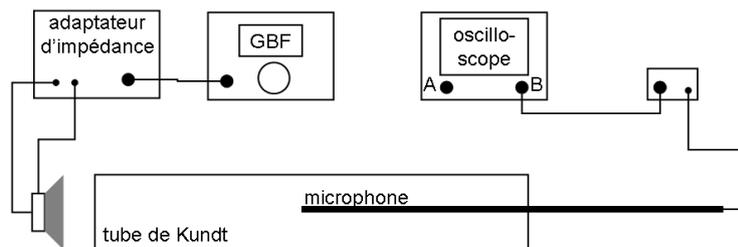


Figure 6: Schéma du montage expérimental

2. allumer le GBF
3. régler la fréquence à une valeur inférieure à 50 Hz
4. régler l’amplitude à 10 mV_{pp}
5. allumer le boîtier d’alimentation du microphone
6. allumer l’oscilloscope

Éteindre le GBF lorsque vous ne prenez pas de mesure. À la fin de votre TP, appliquer la procédure inverse pour arrêter le dispositif.

B Fréquences de résonance et ondes stationnaires dans un tube ouvert

Dans ce montage, le signal détecté par le microphone est observé sur la voie B de l’oscilloscope. Le GBF délivre une tension sinusoïdale d’amplitude crête à crête égale à 10 mV et de fréquence initiale f d’environ 50 Hz.

B-1 Fréquences de résonance

☞ Placer le microphone au centre du tube. Augmenter progressivement la fréquence. Déterminer la fréquence f_1 la plus basse pour laquelle vous observez une variation notable de l’intensité détectée par le microphone (peut aussi être perçue à l’oreille). Ceci indique que le son émis par le haut-parleur a été amplifié par le tube. Cette fréquence est la première fréquence (ou fondamentale) de résonance du tube.

☞ En augmentant la fréquence progressivement, déterminer les fréquences des harmoniques suivantes f_n :

- $n = 2$, avec le microphone au quart du tube
- $n = 3$, avec le microphone au milieu du tube
- $n = 4$, avec le microphone au huitième du tube
- $n = 5$, avec le microphone au milieu du tube
- $n = 6$, avec le microphone au douzième du tube

☞ Reporter les résultats dans un tableau où apparaîtront les différentes fréquences et le rapport f_n/f_1 . Que constatez-vous ?

B-2 Ondes stationnaires

- ☞ Ajuster la fréquence afin d'observer la résonance fondamentale du tube f_1 ,
- ☞ En déplaçant le microphone à l'intérieur du tube, noter les positions pour lesquelles l'amplitude du signal observé à l'oscilloscope est maximale (x_{\max}) ou minimale (x_{\min}).
- ☞ Décrire le comportement de l'onde sonore au voisinage des extrémités du tube.
- ☞ Recommencer la même expérience pour les 3 premières harmoniques.
- ☞ À l'aide de ces mesures, représenter graphiquement le comportement de l'onde pour chaque fréquence. Préciser notamment la position des nœuds et des ventres de pression.
- ☞ Interpréter ces résultats en vous aidant de la partie théorique. Conclure.

- ☞ Noter les différentes longueurs du tube ΔL pour lesquelles une résonance est observée. Reporter les résultats dans un tableau. Que dire de l'écart ΔL entre 2 longueurs de résonance successives (voir partie B-II-3) ?

D-2 Vitesse du son

- ☞ Refaire l'expérience précédente pour 3 autres fréquences (par exemple, 800, 600, et 400 Hz).
- ☞ Calculer, à partir de ces résultats, la valeur de la longueur d'onde du son pour chaque fréquence. En déduire une valeur expérimentale de la vitesse de propagation du son dans l'air.
- ☞ Cette vitesse dépend-elle de la fréquence ?
- ☞ Comparer cette valeur à la valeur théorique donnée par l'équation (4).

C Tube à une extrémité fermée

- ☞ Insérer le piston à l'intérieur du tube (*demander à l'enseignant de vous aider*) et placer le à la position repérée sur la règle graduée par l'abscisse $x = 80$ cm. Le tube est ainsi fermé à une de ses extrémités.
- ☞ En partant d'une fréquence de l'ordre de 50 Hz, recommencer l'expérience de recherche des fréquences de résonance pour
 - $n = 1$ et 2, avec une amplitude du GBF égale à 30 mV_{pp}
 - $n = 3, 4$ et 5, avec une amplitude du GBF égale à 10 mV_{pp}
- ☞ Reporter les résultats $f'_1, f'_n, \frac{f'_n}{f'_1}$ dans un tableau. Que constatez-vous ?
- ☞ Interpréter ces résultats en vous aidant de la partie théorique.

D Modes de résonance et longueur du tube

D-1 Résonance.

- ☞ Placer le piston à l'extrémité du tube opposée au haut-parleur. Régler le GBF pour qu'il délivre une tension sinusoïdale d'amplitude crête à crête égale à 10 mV et de fréquence f égale à 1000 Hz.
- ☞ Déplacer lentement le piston vers le haut-parleur jusqu'à observer la première résonance du tube. Noter la position du piston. Déplacer le piston jusqu'à observer une nouvelle résonance. Répéter les mêmes opérations jusqu'à ce que le piston soit à l'autre extrémité du tube.

TP 3

Phénomène de modulation appliqué à la détermination de la vitesse de la lumière

La vitesse de la lumière dans le vide c , est une constante fondamentale qui a fait l'objet de nombreuses mesures depuis celle de Galilée.

Tous les rayonnements électromagnétiques se propagent dans le vide à la même vitesse c quelle que soit la fréquence du rayonnement. Aucun signal ne peut être transmis par quelque moyen que ce soit à une vitesse supérieure à c . La vitesse de la lumière c est une grandeur constante, un invariant, dans tous les systèmes de référence animés de mouvements relatifs uniformes. Cette hypothèse n'a jamais été mise en défaut jusqu'à présent et a servi de principe de base à l'élaboration de la théorie de la relativité.

A Introduction

Dans l'antiquité, la conception de la lumière comme entité instantanée et intemporelle faisait force de loi. Au début du 17^e siècle, Galilée fut le premier à se demander à quelle vitesse voyage la lumière. Il tenta alors de mesurer cette vitesse entre deux collines de Toscane à l'aide de lanternes à volet, mais il n'y parvint pas, car ses instruments étaient trop rudimentaires. À la fin du même siècle, l'observation des éclipses de Jupiter par Ole Römer, non conformes aux prévisions, a convaincu les chercheurs que la lumière possède une vitesse finie.

Deux siècles plus tard, Fizeau effectue la première mesure terrestre en utilisant une roue dentée. En 1850, Foucault utilise un miroir tournant. Grâce à ces dispositifs, la théorie d'Huygens, proposant que la vitesse de propagation de la lumière est plus faible dans des milieux matériels, est vérifiée. Sans l'utilisation de ces montages difficiles à mettre en œuvre, la détermination de la vitesse c est basée sur la mesure du temps t mis par la lumière pour parcourir une distance L . Étant donné la valeur très élevée de c , sa mesure précise nécessite des distances L très grandes (>kilomètre) ou des appareils de mesure de grande sensibilité (<nanoseconde) pour la détermination de très courts intervalles de temps de propagation.

Ce TP propose d'utiliser une méthode de modulation de l'intensité de la lumière qui permet la réalisation d'une mesure de la vitesse de la lumière à un niveau de précision correct avec des appareils de mesure du temps de sensibilité courante (0,1 s) et une propagation sur une distance d'un mètre environ.

L'étude expérimentale se décompose en deux parties : dans un premier temps, l'étude du phénomène de modulation grâce à des montages électroniques et dans un second temps, l'utilisation de ce phénomène dans un montage optoélectronique de mesure de la vitesse de la lumière.

B Modulation résultant de la multiplication de deux signaux sinusoïdaux

Afin de comprendre le fonctionnement du dispositif de mesure qui sera utilisé dans la partie , on propose d'étudier le produit, filtré ou non, des deux signaux $x_1(t) = A \cos(\omega_1 t)$ et $x_2(t) = A \cos(\omega_2 t)$.

Démontrer que le signal $y(t) = x_1(t) \cdot x_2(t)$ s'écrit :

$$y(t) = \frac{A^2}{2} [\cos((\omega_1 + \omega_2) t) + \cos((\omega_1 - \omega_2) t)]$$

Vous disposez:

- d'un multiplicateur analogique fonctionnant grâce à une alimentation +15V/-15V.
- d'un filtre passe-bas, puis un filtre passe-haut dont les fréquences de coupure sont toutes deux voisines de 10 kHz.

Réaliser, à l'aide de ce dispositif, la multiplication de deux signaux sinusoïdaux $x_1(t) = A \cos(\omega_1 t)$ et $x_2(t) = A \cos(\omega_2 t)$. délivrés par les deux générateurs⁴.

Observer le résultat de la multiplication des deux signaux à l'oscilloscope et reporter un schéma du signal observé, en prenant soin de bien préciser les fréquences des deux signaux $x_1(t)$ et $x_2(t)$ utilisés ainsi que la base de temps de l'oscilloscope utilisée pour l'observation.

Quel est le résultat du filtrage du signal $y(t)$ par le filtre passe-bas ? Mesurer en particulier précisément la fréquence du signal filtré. Commenter le résultat.

Mêmes questions pour le filtre passe-haut.

C Fonctionnement du dispositif.

Pour mesurer la vitesse de la lumière, on module sinusoïdalement l'intensité d'une source lumineuse rouge à la fréquence f (modulation de période T). L'intensité du rayonnement lumineux s'écrit $I(t) = I_0 \cos(2\pi f t)$ et un récepteur placé à proximité immédiate de la source lumineuse convertira ces variations d'intensité en une tension sinusoïdale: $U = a \cos(2\pi f t)$.

4. On prendra par exemple $A = 2$ V; les fréquences des deux signaux devront être relativement proches, par exemple $f_1 = 100$ kHz et $f_2 = 98$ kHz.

Si le récepteur est placé à une distance Δd de l'émetteur de lumière, la propagation induit un retard

$$\Delta t_{\text{réel}} = \frac{\Delta d}{c} \quad (1)$$

qui se traduit par un déphasage du signal reçu :

$$\Delta\varphi = 2\pi f \Delta t_{\text{réel}} = 2\pi \frac{\Delta d}{T} \quad (2)$$

Le récepteur mesure, hormis d'éventuelles pertes d'intensité, le signal déphasé (Fig. 1) :

$$u = A \cos(2\pi f t - \Delta\varphi).$$

Connaissant Δd , la mesure de $\Delta\varphi$ permet la détermination de la vitesse de la lumière par la relation :

$$c = 2\pi f \frac{\Delta d}{\Delta\varphi}.$$

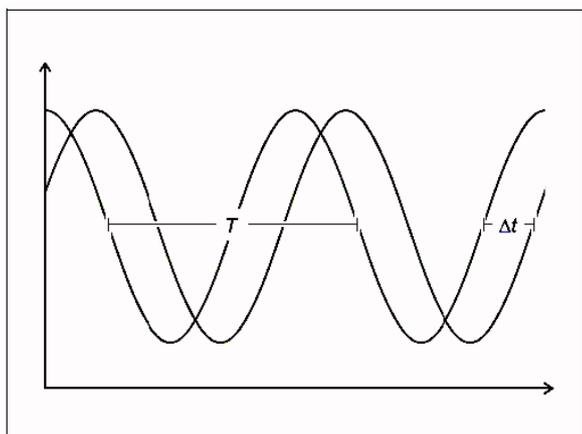


Figure 1: représentation du déphasage d'un signal périodique

En choisissant une très grande fréquence de modulation, on obtient des déphasages significatifs pour des distances de propagation courtes.

 Déterminer la distance de propagation Δd donnant un déphasage de 2π pour une fréquence de 60 MHz.

 Sachant que la bande passante des oscilloscopes dont vous disposez est de 20 MHz (ce qui implique que la plus petite mesure de décalage temporel accessible est de 50 ns), concluez que la détermination directement par déphasage de la vitesse de la lumière est difficilement réalisable en TP.

On utilise la modulation pour observer, dans une gamme de fréquences de l'ordre de la centaine de kHz, des déphasages significatifs entre le signal émis par la source et le signal recueilli par le récepteur. Le signal sinusoïdal appliqué à la source lumineuse est multiplié électroniquement par un signal sinusoïdal de fréquence $f_2 = 59,9$ MHz.

Le signal électrique résultant de cette multiplication peut être représenté comme étant la somme d'un signal de fréquence

$f_s = f_1 + f_2$ et d'un signal de fréquence $f_d = f_1 - f_2$. Au niveau de l'émetteur, la tension électrique s'écrit donc :

$$U_e = \frac{a}{2} [\cos(2\pi f_s t) + \cos(2\pi f_d t)].$$

Le signal au niveau du récepteur est déphasé de $\Delta\varphi$ par rapport au signal émis et s'écrit :

$$U_r = \frac{a}{2} [\cos(2\pi f_s t - \Delta\varphi) + \cos(2\pi f_d t - \Delta\varphi)].$$

Si la composante haute fréquence est supprimée par un filtre passe-bas, il ne reste que deux signaux de basse fréquence $f_d = f_1 - f_2$ déphasés l'un par rapport à l'autre d'une quantité $\Delta\varphi$. La fréquence f_d étant seulement de 100 kHz, ces deux signaux peuvent être observés grâce à un oscilloscope standard. Le déphasage $\Delta\varphi$ n'a pas changé suite au mixage et au filtrage, mais il correspond maintenant à un retard :

$$\Delta t_{\text{mes}} = \frac{\Delta\varphi}{2\pi f_d} = \frac{\Delta\varphi}{2\pi (f_1 - f_2)} \quad (3)$$

Pour obtenir le *temps de propagation réel* $\Delta t_{\text{réel}}$ du signal lumineux sur la section de mesure Δd , on utilise les relations (2) et (3). Avec la relation (1), il vient la relation entre Δt_{mes} et la vitesse de lumière c :

$$\Delta t_{\text{réel}} = \frac{\Delta d}{c} = \frac{f_1 - f_2}{f_1} \Delta t_{\text{mes}} \quad (4)$$

Le retard associé à la propagation $\Delta t_{\text{réel}}$ étant extrêmement court (environ 3 ns sur une distance de 1 mètre), l'utilisation précédemment faite du phénomène de modulation permet de le multiplier par une quantité égale à $\frac{f_1}{f_1 - f_2}$, soit par un facteur 600 dans l'expérience réalisée.

Finalement, il est à noter que les signaux électriques se propagent également dans les câbles coaxiaux reliant les différents appareils du dispositif. Les retards associés à cette propagation de la lumière dans l'air et ne sont donc pas du tout négligeables. Il est possible dans l'expérience que vous allez réaliser d'introduire un déphasage purement électronique entre les deux signaux observés et ainsi de s'affranchir des effets de déphasage indésirables associés à la propagation dans les câbles.

D Mesure de la vitesse de la lumière

Vous disposez :

1. d'un émetteur – récepteur de lumière
2. d'un banc optique
3. d'une lentille de distance focale 15 cm
4. d'un oscilloscope à 2 canaux
5. d'un tube rempli d'eau de longueur 1 m
6. d'un cylindre de plexiglas de longueur 20 cm



Mise en place :

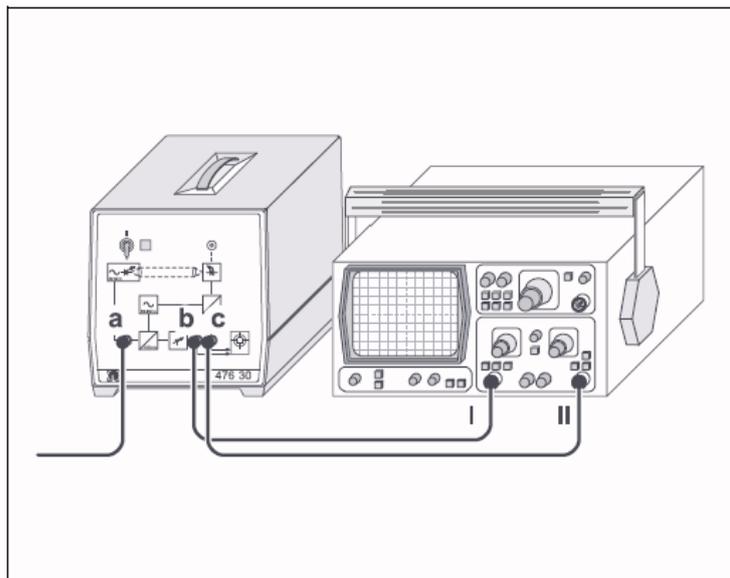


Figure 2: Schéma du branchement du montage expérimental

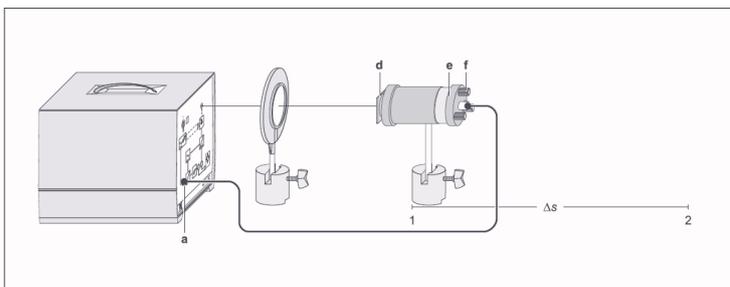


Figure 3: Schéma de principe du montage optique

1. Vérifier le montage de la figure 2 après s'être assuré que tous les appareils sont éteints.

- ☞ (a) doit être relié à l'émetteur de lumière
- ☞ (b) doit être relié à la voie 1 de l'oscilloscope
- ☞ (c) doit être relié à la voie 2 de l'oscilloscope

2. Allumer l'émetteur – récepteur pour procéder au réglage optique (voir figure 3) :

- ☞ Effectuer les réglages optiques de base : s'assurer que tous les éléments du montage sont alignés et que le faisceau est bien dans l'axe du banc. Si nécessaire, vérifier sur chaque élément la position du faisceau avec une feuille blanche. On pourra se servir du système de réglage 3 points (f).
- ☞ Positionner l'émetteur à au moins 1 m du récepteur et s'assurer que le spot lumineux au niveau du récepteur est le plus uniforme possible. Si nécessaire, ajuster la taille du spot à l'aide du socle (e) et du condenseur (d).
- ☞ Positionner la lentille le long de l'axe du faisceau de manière à obtenir une amplitude maximale du signal à l'oscilloscope (plusieurs V_{PP}).

- ☞ Approcher l'émetteur du récepteur en le faisant glisser le long du banc. L'amplitude du signal doit augmenter ou rester stable. Si non, reprendre le réglage optique.

D-1 Mesure de la vitesse de la lumière dans l'air.

Placer l'émetteur à une vingtaine de centimètres du récepteur. Pour cette position de référence x_1 de l'émetteur, mettre les deux signaux en phase à l'aide du bouton de réglage de la phase se trouvant sur le boîtier du récepteur. Utiliser éventuellement la fonction XY de l'oscilloscope pour une meilleure précision

- ☞ Déplacer lentement l'émetteur sur le banc. Que constatez-vous sur l'oscilloscope ? Expliquer.
- ☞ Déplacer l'émetteur jusqu'à une position x_2 à partir de la position de référence choisie. Mesurer sur l'oscilloscope le décalage en temps Δt_{mes} du signal récepteur par rapport au signal émetteur pour une section de mesure $\Delta d = x_2 - x_1$ (par exemple 1 m). Déduire la valeur de $\Delta t_{\text{réel}}$ puis celle de c .

- ☞ Exprimer l'incertitude relative $\frac{\Delta c}{c}$ en fonction des incertitudes relatives sur Δd et Δt_{mes} (on négligera les incertitudes sur les fréquences). Calculer la précision de la mesure et écrire le résultat sous la forme $c \pm \Delta c$.

- ☞ Comparer ce résultat avec la valeur théorique $c_{\text{th}} = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$. Si cette valeur ne rentre pas dans l'intervalle d'incertitude, proposer une méthode permettant de minimiser l'incertitude et refaire la mesure.

D-2 Détermination de la vitesse de la lumière dans un milieu matériel

La vitesse v_i de propagation des ondes lumineuses, dans un milieu i autre que le vide, est toujours inférieure à c . L'indice de réfraction n_i d'un milieu transparent, homogène et isotrope est défini comme le rapport des vitesses de la lumière dans le vide c et dans le milieu v_i : $n_i = \frac{c}{v_i}$. Dans cette partie, nous allons déterminer la vitesse de propagation de la lumière dans l'eau, puis dans un plexiglas.

Méthode de mesure.

Le milieu matériel à étudier a une longueur Δd_i et un indice n_i . Dans la méthode de mesure proposée, on commence par mettre les signaux émetteur et récepteur en phase pour une distance Δd entre l'émetteur et le récepteur dans l'air. Le signal parcourt alors cette distance en un temps que l'on notera t_1 .

On déplace ensuite l'émetteur d'une longueur Δd_i correspondant à celle du milieu, puis on intercale le milieu entre l'émetteur et le récepteur. Le signal parcourt maintenant la distance $\Delta d + \Delta d_i$ en un temps que l'on notera t_2 . On observe alors un décalage temporel Δt_{mes} , que l'on corrige pour obtenir $\Delta t_{\text{réel}}$ correspondant au temps mis par la lumière pour parcourir le milieu de longueur Δd_i à la vitesse v_i : $\Delta t_{\text{réel}} = \frac{\Delta d_i}{v_i}$.

- ☞ Exprimer $\Delta t_{\text{réel}}$ en fonction de t_1 et t_2 , puis en fonction de Δd , c , Δd_i et v_i . Retrouver ainsi l'expression ci-dessus.

Vitesse de la lumière dans l'eau.

- ☞ En utilisant le tube de longueur 1 m contenant de l'eau, déterminer la vitesse de la lumière v_{eau} dans l'eau. En déduire l'indice de réfraction n_{eau} de l'eau.
- ☞ Déterminer les incertitudes sur v_{eau} et n_{eau} .
- ☞ la valeur de l'indice obtenue par cette méthode est-elle en accord avec la valeur couramment admise (1,33)?

Vitesse de la lumière dans le plexiglas.

- ☞ En utilisant le bloc de plexiglas de longueur 20 cm, déterminer la vitesse de la lumière v_{plexi} dans le plexiglas. En déduire l'indice de réfraction n_{plexi} du plexiglas.
- ☞ Déterminer les incertitudes sur v_{plexi} et n_{plexi} .
- ☞ En conclusion, commenter la précision de cette méthode de mesure de la vitesse de la lumière.

E *Étude du phénomène de battement par addition de signaux*

Ce phénomène de battement se produit lorsque l'on superpose deux vibrations sinusoïdales de pulsations ω_1 et ω_2 distinctes, cette fois-ci sans utiliser un multiplicateur. Dans le cas où les deux vibrations sont d'amplitudes identiques et égales à A , la vibration $x(t)$ résultant de cette superposition s'écrit :

$$x(t) = A \cos(\omega_1 t) + A \cos(\omega_2 t).$$

On se propose de réaliser expérimentalement l'opération de superposition de deux signaux sinusoïdaux $x_1(t) = A \cos(\omega_1 t)$ et $x_2(t) = A \cos(\omega_2 t)$, délivrés par deux générateurs distincts 1 et 2. Les deux signaux seront d'amplitude identique et de fréquences légèrement différentes. On prendra par exemple : $A = 2 \text{ V}$, $f_1 = 100 \text{ kHz}$ et $f_2 = 90 \text{ kHz}$.

- ☞ Observer d'abord simultanément les deux signaux $x_1(t)$ et $x_2(t)$ sur chacune des voies de l'oscilloscope. Expliquer pourquoi le signal observé sur la voie 2 « défile » lorsque l'oscilloscope est déclenché sur la voie 1. Dans l'expérience, $x_1(t)$ et $x_2(t)$ s'écrivent-ils mathématiquement de la même façon que ci-dessus ?
- ☞ Pour réaliser la superposition des deux signaux, il suffit de brancher les deux générateurs en parallèle aux bornes d'une résistance de 50Ω . Observer le résultat de la superposition des deux signaux à l'oscilloscope et reporter sur votre compte-rendu un schéma du signal observé. Vous prendrez soin de bien préciser les fréquences des deux signaux utilisés ainsi que la base de temps de l'oscilloscope utilisée pour l'observation.
- ☞ On se propose ensuite de filtrer le signal $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$ par un filtre passe-bas puis un filtre passe-haut dont les fréquences de coupure sont toutes deux voisines de 10 kHz. Quel est le résultat du filtrage du signal $x(t)$ par le filtre passe-bas ? Même question pour le filtrage par le filtre passe-haut. Expliquer le phénomène observé.

TP 4

Étude du câble coaxial

Les câbles coaxiaux sont utilisés dans toutes sortes de connexions en réseaux. Le but du TP est de se familiariser avec les principales caractéristiques du câble coaxial et de comprendre son comportement de guide d'onde. L'étude de la propagation des ondes de tension et de courant dans un câble coaxial fera l'objet d'une séance de TD. Quelques éléments de théorie sont reportés en annexe de ce TP.

Un câble coaxial, qui permet de relier entre eux deux appareils, remplace à lui seul deux fils ordinaires. Il comporte en effet deux conducteurs : le conducteur extérieur, cylindrique et creux, et le conducteur central. Ces deux conducteurs sont séparés par un isolant et l'ensemble est protégé par une gaine plastifiée (Fig. 1).

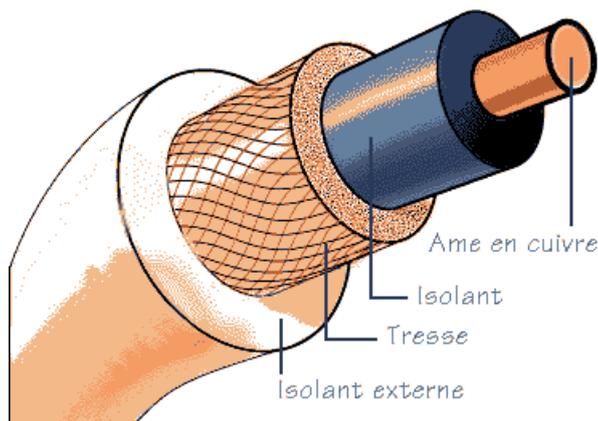


Figure 1: Schéma d'un câble coaxial

Le câble coaxial possède l'avantage, par rapport aux cordons ordinaires, d'offrir une meilleure protection contre les signaux parasites (on parle de blindage).

Pour des raisons de sécurité, le conducteur extérieur, que l'utilisateur peut-être amené à toucher plus facilement que l'âme centrale, est connecté à la carcasse de l'appareil, elle-même reliée à la Terre par le cordon d'alimentation du secteur. Le conducteur central, dont le potentiel n'est en général pas nul, est parfois appelé "point chaud" et ne doit jamais être en contact avec l'utilisateur.

A Caractéristiques linéiques

L'étude porte sur le câble dit **KX 15** (de référence RG58C/U) dont la fiche technique est reproduite dans l'annexe .

A-1 Étude théorique

Capacité linéique

Un câble coaxial constitue un **condensateur** puisqu'il est formé de deux conducteurs en influence totale séparés par un isolant. Si on applique une différence de potentiel entre ces deux conducteurs, des charges de signes opposés s'accumulent sur leurs surfaces en regard, et un champ électrique \vec{E} règne alors dans le matériau diélectrique constituant l'isolant.

Le câble coaxial possède donc une capacité par unité de longueur, ou capacité linéique, notée γ , d'expression :

$$\gamma = \frac{C}{l} = \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$$

où C est la capacité du câble, l sa longueur, R_1 et R_2 les rayons des conducteurs intérieur et extérieur, et ε_r la permittivité diélectrique relative de l'isolant.

- Vérifier l'homogénéité de la relation ci-dessus.
- Calculer la valeur théorique de γ pour le câble KX 15 avec l'aide des données suivantes : $D_2 = 2R_2 = 2,95$ mm, $D_1 = 2R_1 = 0,78$ mm (équivalent aux 19 brins de fil de diamètre 0,18 mm) et $\varepsilon_r = 2,25$ (polyéthylène).
- Comparer γ à la valeur donnée par le constructeur.

Inductance linéique

Le câble coaxial possède également une self inductance par unité de longueur, tout comme une bobine : en effet, lorsqu'un courant électrique circule dans le conducteur intérieur, il revient par le conducteur extérieur et crée dans la zone intermédiaire, c'est-à-dire l'isolant, un champ magnétique \vec{B} . Si le flux de \vec{B} varie, il se produit un phénomène d'auto-induction dans le câble.

Le câble coaxial possède une inductance linéique, notée λ , telle que :

$$\lambda = \frac{L}{l} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$$

où L est l'inductance du câble et μ_0 la perméabilité magnétique du vide.

- Sachant que la constante $\frac{\mu_0}{4\pi}$ est égale à 10^{-7} H.m⁻¹, calculer la valeur de l'inductance linéique λ du câble KX 15.
- Trouver la relation qui existe entre γ , λ et ε_r , sachant que $\varepsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$.

A-2 Mesures des caractéristiques linéiques γ et λ du câble

Préparation

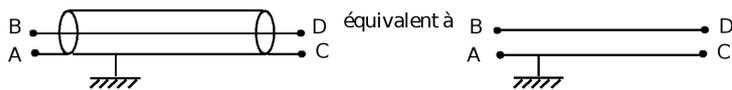


Figure 2: Schéma équivalent du câble

Un câble coaxial est un quadripôle, de bornes A B C D

Vu entre les bornes A et B, il constitue un dipôle, dont on cherche à mesurer la capacité et l'inductance.

Ces mesures seront faites à l'aide d'un LC-mètre dont la notice est disponible en salle de TP. Son usage est très simple puisque, placé en mesure de L ou de C et sur la position adéquate du sélecteur, il donne directement l'inductance ou la capacité du dipôle AB relié à ses bornes.

Pour relier le câble étudié au LC-mètre, on est obligé de le prolonger par un câble BNC-banane de 1 mètre à l'aide d'une connexion "T".

✎ Comment faire pour ne mesurer que la capacité et l'inductance du câble étudié et pas celle du morceau de câble supplémentaire ?

Pour la mesure de capacité, l'extrémité CD du câble est ouverte (ou fermée sur une résistance infinie). Par contre, pour la mesure d'inductance, on doit relier entre elles les bornes C et D en fermant l'extrémité CD sur une résistance nulle.

✎ Justifier ces deux conditions.

Mesures

✎ Mesurer la capacité et l'inductance de trois câbles KX 15 de longueurs 1 m, 10 m et 100 m (bobine), regrouper les valeur dans un tableau.

✎ La notion de capacité et d'inductance "linéique" est-elle justifiée ? Laquelle de ces trois mesures est la plus précise ? Pourquoi ?

✎ Comparer aux valeurs théoriques, et γ à la valeur du constructeur. Conclure.

Détermination de ϵ_r

✎ Dédire des mesures de γ et λ une valeur expérimentale de la permittivité diélectrique relative ϵ_r du polyéthylène.

✎ Comparer cette valeur à celle donnée au début du chapitre. Conclure.

B Le câble coaxial est un "guide d'onde"

Lors d'une utilisation courante en TP, les câbles coaxiaux ont des longueurs de l'ordre du mètre. La tension délivrée par le GBF est transmise quasi instantanément à l'oscilloscope. Il n'en est pas de même pour des câbles de plusieurs dizaines ou plusieurs centaines de mètres

B-1 Étude théorique

On montre que le câble coaxial est un **guide d'onde**: l'onde électromagnétique créée en un point du câble (dans l'espace entre les deux conducteurs) se propage le long du câble (dans le diélectrique). La vitesse v de l'onde dépend de la permittivité ϵ_r du diélectrique, selon l'expression :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\gamma\lambda}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide.

✎ Calculer, par l'une des formules ci-dessus, la valeur de la vitesse de propagation v de l'onde dans votre câble KX 15 en utilisant vos mesures pour γ , λ et ϵ_r .

✎ Commenter l'ordre de grandeur du résultat.

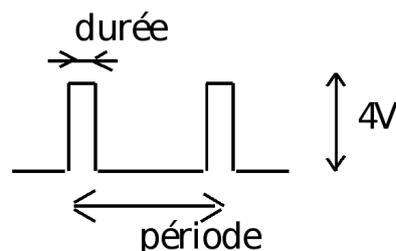
B-2 Étude de la propagation

Dans cette partie du TP, on observe la propagation, le long du câble, d'une impulsion de tension créée à l'une de ses extrémités. Le câble n'étant pas infini, il faudra tenir compte de la réflexion des ondes aux extrémités du guide d'onde.

L'impulsion est fournie par un générateur d'impulsions dont la notice est disponible en salle de TP.

⚡ Montage (Fig. 3) :

1. Observer le signal du générateur d'impulsions en voie 1 de l'oscilloscope.
2. Choisir la sortie positive (14) du générateur d'impulsions qui donne une impulsion orientée "vers le haut" (touche poussoir 15 relâchée) et une amplitude maximale de 5V (touche poussoir 13 enfoncée).



3. Régler la fréquence des impulsions à une valeur inférieure à 300 kHz et le rapport cyclique à une valeur autour de 10 % . Pour l'amplitude, on prendra 4 V.
4. De l'autre côté du T, connecter le câble coaxial KX 15 de 100 m et, à l'aide d'un second T placé à l'autre extrémité du câble, observer en voie 2 de l'oscilloscope le signal recueilli au bout du câble.

Remarque : Les deux voies de l'oscilloscope doivent être en DC et la synchronisation en automatique. Si le signal n'est pas visible, jouer sur le bouton level. Penser éventuellement à synchroniser l'oscilloscope sur un signal extérieur pris à la sortie TRIG OUT TTL du générateur d'impulsions (6). Décaler verticalement les deux voies de l'oscilloscope.

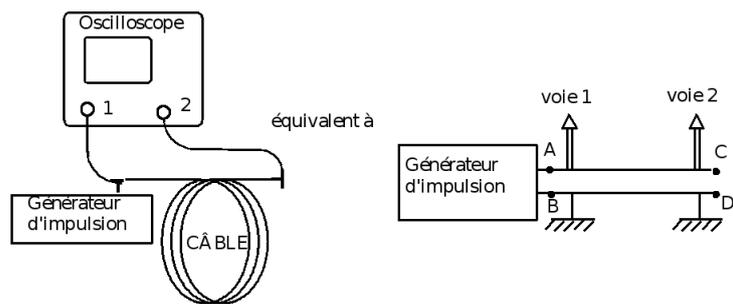


Figure 3: Schéma du montage pour l'étude de la propagation

Observation et interprétation

- Représenter soigneusement l'oscillogramme bi-courbe obtenu, en relevant la position des impulsions sur l'axe des temps, leur amplitude et leur forme. Indiquer également la valeur des sensibilités de l'oscilloscope.
- Pour mieux comprendre le phénomène, on pourra faire varier doucement la fréquence du générateur d'impulsions. À quoi correspond chacune des trois impulsions observées ?
- Interpréter les décalages dans le temps entre les impulsions ainsi que leurs amplitudes.

Mesure de la vitesse de propagation v

- Déterminer la vitesse de propagation v de l'impulsion le long du câble en expliquant la méthode employée.
- Comparer v à la valeur obtenue par la formule théorique. Conclure.

B-3 Impédance caractéristique R_C

Observations et interprétation

Jusqu'à présent, l'extrémité du câble était "ouverte". Autrement dit, les extrémités C et D des conducteurs interne et externe étaient fermées sur une résistance infinie ou très grande, comme celle de l'oscilloscope ($\simeq 1 \text{ M}\Omega$).

- Connecter maintenant cette extrémité à une terminaison $R \simeq 0 \Omega$.
- Représenter le nouvel oscillogramme bicourbe obtenu. Qu'y a-t-il de changé par rapport à l'oscillogramme obtenu à la section ?
- Dédire des changements observés en voie 1 l'influence de la valeur de la résistance R placée à l'extrémité du câble.

- À l'aide des conclusions précédentes, interpréter la forme du signal maintenant observable en voie 2 (on devra éventuellement augmenter fortement la sensibilité sur cette voie).

Mesure de R_c

- Connecter maintenant à l'extrémité du câble une boîte de résistances à décades (Fig. 4).
- Montrer expérimentalement qu'il existe une valeur particulière de la résistance R placée au bout du câble pour laquelle aucune onde n'est réfléchi.
- On l'appelle la résistance caractéristique du câble et on la note R_c .
- Comparer R_c mesurée à la valeur du constructeur. Remplacer la boîte de résistances par la terminaison standard dite "bouchon 50Ω ". Qu'observe-t-on ?

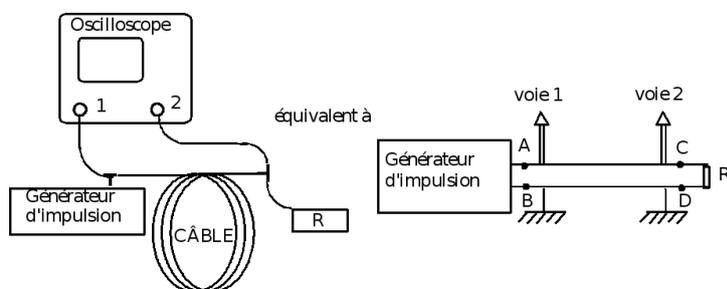


Figure 4: Schéma de montage

Expression théorique de R_c

L'étude théorique donne : $R_c = \sqrt{\frac{\lambda}{\gamma}}$.

- ✎ Vérifier que cette expression a bien la dimension d'une impédance.
- Calculer par cette formule la valeur de R_c pour votre câble et la comparer à la valeur mesurée. Conclure.

Adaptation d'impédance

L'onde, après s'être réfléchi à l'extrémité du câble, par exemple pour R infinie ou nulle, repart en direction du générateur d'impulsion.

- Subit-elle de nouveau une réflexion au niveau du générateur ? Quelle est l'impédance de sortie du générateur d'impulsion ? Expliquer.
- On dit qu'il y a *adaptation d'impédance* entre le générateur et le câble. Expliquer.

C Étude en fréquence

Pour cette étude, on utilise un "analyseur de spectre", modèle HM 5006, dont la notice est disponible en salle de TP.

Le but de cette partie est de savoir comment le câble coaxial se comporte vis à vis des différentes fréquences. Pour cela, on applique à l'extrémité du câble un signal sinusoïdal dont l'atténuation est fixe tandis que sa fréquence est balayée sur un large domaine. C'est la borne OUTPUT (23) du HM 5006 qui joue ce rôle. On analyse ensuite le signal qui parvient à l'autre extrémité du câble en reliant celle-ci à la borne INPUT (13) du HM 5006 qui est l'analyseur de spectre proprement dit.

L'analyseur de spectre affiche une courbe dont l'abscisse est la fréquence du signal selon une échelle linéaire et où l'ordonnée est l'intensité du signal en décibels. On rappelle que le coefficient d'atténuation en décibels (dB) est égal à

$$20 \log \frac{U_s}{U_e},$$

où U_s et U_e sont respectivement les tensions de sortie et d'entrée.

Quelles sont les impédances d'entrée et de sortie de l'analyseur de spectre ? Commenter.

C-1 Étude de l'atténuation du signal en fonction de la fréquence

Montage : Réaliser le montage avec le câble KX 15 de 100 m. Choisir la sensibilité horizontale de 50 MHz par division de manière à observer la réponse du câble pour toutes les fréquences comprises entre 0 et 500 MHz.

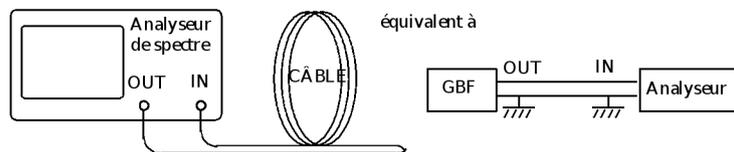


Figure 5: Étude en fréquence

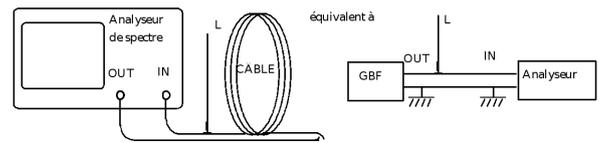
Représenter sur un schéma l'allure de la courbe qui s'affiche à l'écran de l'analyseur de spectre. Le câble laisse-t-il passer de la même manière les basses et les hautes fréquences ? Comment peut-on le caractériser ?

Mesurer le coefficient d'atténuation en dB du câble KX 15 de 100 m pour un intervalle de fréquence de 100 MHz.

Faire la même mesure pour le câble KX 15 de 10 m et la comparer aux indications du constructeur. Comment la longueur du câble joue-t-elle sur l'atténuation ?

C-2 Étude d'un câble comportant une ramification

Montage : Reprendre le câble KX 15 de 100 m et lui ajouter une ramification de 1 m de long dont l'extrémité libre est "ouverte" ($R \rightarrow \infty$).



Représenter sur un schéma la nouvelle courbe affichée par l'analyseur de spectre. Quelles modifications notables apporte la ramification ?

Noter les fréquences dites d'antirésonance. Mesurer leur intervalle $\Delta\nu$.

Donner ensuite à la longueur L_r de la ramification les valeurs de 2 m puis 4 m et mesurer à chaque fois l'intervalle $\Delta\nu$ entre deux fréquences successives d'antirésonance.

Comment varie l'écart $\Delta\nu$ en fonction de la longueur L_r de la ramification ?

Qu'y a-t-il de changé si l'extrémité de la ramification est fermée sur une résistance nulle ?

Interpréter, y compris quantitativement, ces antirésonances et donner la relation entre $\Delta\nu$ et L_r en considérant d'une part l'onde qui se propage dans le câble sans être passée par la ramification et d'autre part celle qui a fait un aller-retour dans cette ramification.

D Annexes

D-1 Théorie sur le câble coaxial comme "guide d'onde"

Le schéma de la figure 6 représente l'équivalent d'une longueur infiniment petite dx de câble coaxial, de capacité γdx et d'inductance λdx . Il est cohérent avec l'existence pour le câble d'une inductance linéique et d'une capacité linéique puisque la bobine de la tranche dx est placée en série, et sa capacité en parallèle avec celles de la tranche suivante. Or on sait que des inductances en série et des capacités en parallèle s'ajoutent.

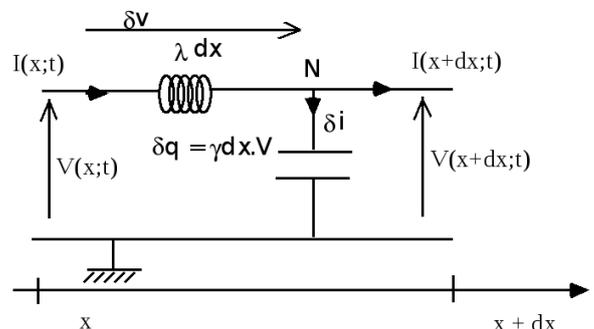


Figure 6: Schéma équivalent

Par contre, ce schéma ne considère aucune résistance : ni résistance interne des bobines, ni résistance de fuite des condensateurs. En cela, c'est un modèle simplifié du câble qui ne

peut pas rendre compte des phénomènes dissipatifs qui s’y produisent à savoir l’atténuation du signal.

Appliquons la loi des nœuds en N :

$$I(x, t) = I(x + dx, t) + \delta i,$$

d’où

$$\frac{\partial I}{\partial x} dx = -\delta i.$$

or $\delta i = \frac{\partial \delta q}{\partial t}$ avec $\delta q = \gamma dx V$ c’est-à-dire :

$$\delta i = \gamma dx \frac{\partial V}{\partial t}.$$

D’où il vient :

$$\frac{\partial I}{\partial x} = -\gamma \frac{\partial V}{\partial t}. \tag{1}$$

D’autre part, la loi des mailles donne :

$$V(x + dx, t) = V(x, t) + \delta v$$

où δv est la tension aux bornes de la bobine λdx , en convention générateur. Donc $\delta v = -\lambda dx \frac{\partial I}{\partial t}$ d’où il vient :

$$\frac{\partial V}{\partial x} = -\lambda \frac{\partial I}{\partial t}. \tag{2}$$

Si on dérive l’équation (1) par rapport à x il vient :

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = -\gamma \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial t} = \gamma \lambda \frac{\partial^2 I}{\partial t^2}. \tag{3}$$

en utilisant l’égalité des dérivées partielles croisées (indépendance du temps et de l’espace).

L’équation (3) est de la forme d’une équation de propagation en I :

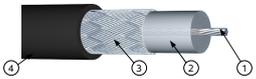
$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 I}{\partial t^2},$$

avec une vitesse de propagation

$$v = \frac{1}{\sqrt{\gamma \lambda}}.$$

On obtient de la même manière l’équation de propagation pour la tension V à l’aide de l’équation (2) dérivée et de l’équation (1).

D-2 Fiche technique du câble

110120-00 KX 15 / RG 58CU																																																																																																																	
																																																																																																																	
																																																																																																																	
<table border="1"> <tr> <th colspan="2">Construction</th> <th colspan="2">Electrical characteristics</th> </tr> <tr> <td>Inner conductor</td> <td>①</td> <td>Impedance</td> <td>50 ± 2 Ω</td> </tr> <tr> <td>Material</td> <td>Tinned Copper</td> <td>Capacitance</td> <td>< 101 pF/m</td> </tr> <tr> <td>Diameter</td> <td>19 x Ø 0.19 ± 0.005 mm</td> <td>Max DC resistance</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Dielectric</td> <td>②</td> <td>Inner conductor</td> <td>35.4 Ω/Km</td> </tr> <tr> <td>Material</td> <td>Solid PE</td> <td>Outer conductor</td> <td>15 Ω/Km</td> </tr> <tr> <td>Color</td> <td>Natural</td> <td>Propagation velocity ratio</td> <td>66%</td> </tr> <tr> <td>Diameter</td> <td>Ø 2.95 mm</td> <td>Max operating voltage RMS</td> <td>1900 V</td> </tr> <tr> <td>Outer conductor</td> <td></td> <td>Insulation resistance 20°C</td> <td>>1000 MΩ/km</td> </tr> <tr> <td>1st Layer</td> <td>③</td> <td>Longitudinal attenuation</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Material</td> <td>Tinned Copper</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Braiding</td> <td>16 x (7 x Ø 0.12 ± 0.003 mm)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Coverage</td> <td>92.8%</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Sheath</td> <td>④</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Material</td> <td>PVC</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Color</td> <td>Black RAL 9005</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Diameter</td> <td>Ø 4.95 ± 0.15 mm</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Mass</td> <td>39 kg/km</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="4">Marking on sheath</td> </tr> <tr> <td>Printing</td> <td colspan="3">« KX15 / RG 58CU – MIL C17 – 50 OHMS - elbaC – XXX m »</td> </tr> <tr> <td>Color / Process</td> <td colspan="3">White / Ink jet</td> </tr> <tr> <td>Step</td> <td colspan="3">1 m</td> </tr> <tr> <td>Stripping force / 50 mm</td> <td colspan="3"></td> </tr> <tr> <td>Dielectric</td> <td colspan="3">15 N ≤ F ≤ 35 N</td> </tr> <tr> <td colspan="4">Meet Standards</td> </tr> <tr> <td colspan="4">MIL C17 RoHS European directive</td> </tr> <tr> <td colspan="4">Notes</td> </tr> <tr> <td colspan="4"> </td> </tr> </table>		Construction		Electrical characteristics		Inner conductor	①	Impedance	50 ± 2 Ω	Material	Tinned Copper	Capacitance	< 101 pF/m	Diameter	19 x Ø 0.19 ± 0.005 mm	Max DC resistance		Dielectric	②	Inner conductor	35.4 Ω/Km	Material	Solid PE	Outer conductor	15 Ω/Km	Color	Natural	Propagation velocity ratio	66%	Diameter	Ø 2.95 mm	Max operating voltage RMS	1900 V	Outer conductor		Insulation resistance 20°C	>1000 MΩ/km	1 st Layer	③	Longitudinal attenuation		Material	Tinned Copper			Braiding	16 x (7 x Ø 0.12 ± 0.003 mm)			Coverage	92.8%			Sheath	④			Material	PVC			Color	Black RAL 9005			Diameter	Ø 4.95 ± 0.15 mm			Mass	39 kg/km			Marking on sheath				Printing	« KX15 / RG 58CU – MIL C17 – 50 OHMS - elbaC – XXX m »			Color / Process	White / Ink jet			Step	1 m			Stripping force / 50 mm				Dielectric	15 N ≤ F ≤ 35 N			Meet Standards				MIL C17 RoHS European directive				Notes							
Construction		Electrical characteristics																																																																																																															
Inner conductor	①	Impedance	50 ± 2 Ω																																																																																																														
Material	Tinned Copper	Capacitance	< 101 pF/m																																																																																																														
Diameter	19 x Ø 0.19 ± 0.005 mm	Max DC resistance																																																																																																															
Dielectric	②	Inner conductor	35.4 Ω/Km																																																																																																														
Material	Solid PE	Outer conductor	15 Ω/Km																																																																																																														
Color	Natural	Propagation velocity ratio	66%																																																																																																														
Diameter	Ø 2.95 mm	Max operating voltage RMS	1900 V																																																																																																														
Outer conductor		Insulation resistance 20°C	>1000 MΩ/km																																																																																																														
1 st Layer	③	Longitudinal attenuation																																																																																																															
Material	Tinned Copper																																																																																																																
Braiding	16 x (7 x Ø 0.12 ± 0.003 mm)																																																																																																																
Coverage	92.8%																																																																																																																
Sheath	④																																																																																																																
Material	PVC																																																																																																																
Color	Black RAL 9005																																																																																																																
Diameter	Ø 4.95 ± 0.15 mm																																																																																																																
Mass	39 kg/km																																																																																																																
Marking on sheath																																																																																																																	
Printing	« KX15 / RG 58CU – MIL C17 – 50 OHMS - elbaC – XXX m »																																																																																																																
Color / Process	White / Ink jet																																																																																																																
Step	1 m																																																																																																																
Stripping force / 50 mm																																																																																																																	
Dielectric	15 N ≤ F ≤ 35 N																																																																																																																
Meet Standards																																																																																																																	
MIL C17 RoHS European directive																																																																																																																	
Notes																																																																																																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Frequency MHz</th> <th>Max attenuation dB/100m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1.3</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>4.6</td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>10.8</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>16.1</td> </tr> <tr> <td>200</td> <td>24.0</td> </tr> <tr> <td>400</td> <td>37.7</td> </tr> <tr> <td>700</td> <td>55.8</td> </tr> <tr> <td>900</td> <td>65.6</td> </tr> <tr> <td>1000</td> <td>70.5</td> </tr> </tbody> </table>		Frequency MHz	Max attenuation dB/100m	1	1.3	10	4.6	50	10.8	100	16.1	200	24.0	400	37.7	700	55.8	900	65.6	1000	70.5																																																																																												
Frequency MHz	Max attenuation dB/100m																																																																																																																
1	1.3																																																																																																																
10	4.6																																																																																																																
50	10.8																																																																																																																
100	16.1																																																																																																																
200	24.0																																																																																																																
400	37.7																																																																																																																
700	55.8																																																																																																																
900	65.6																																																																																																																
1000	70.5																																																																																																																
<table border="1"> <tr> <th colspan="2">Thermal characteristics</th> </tr> <tr> <td>Rated Temperature</td> <td>80°C</td> </tr> <tr> <th colspan="2">Packaging</th> </tr> <tr> <td colspan="2">500 m / wooden drum</td> </tr> </table>		Thermal characteristics		Rated Temperature	80°C	Packaging		500 m / wooden drum																																																																																																									
Thermal characteristics																																																																																																																	
Rated Temperature	80°C																																																																																																																
Packaging																																																																																																																	
500 m / wooden drum																																																																																																																	
<small>© copyright 2007 – elbaC Cable® is a registered trademark 110120-00.pdf 14/09/2007 10:04:09</small>																																																																																																																	

7P 5 Interférences

Le phénomène d'interférences est visible dans certaines situations de la vie courante : irisations des bulles de savon ou ailes de papillons. Tous les types d'ondes peuvent interférer: nous l'observerons d'abord dans le domaine des ondes sonores puis en optique.

Deux ondes **interfèrent** si, en certains points de l'espace, l'intensité résultant de la superposition de ces deux ondes est différente de la somme des intensités de chaque onde arrivant seule. Dans certaines circonstances, il peut se faire alors que **lumière + lumière** donne **l'obscurité**, **mouvement + mouvement** donne **l'immobilité** ou encore **son + son** donne **le silence** !

A Conditions d'interférence

Le phénomène d'interférence entre deux ondes nécessite certaines conditions pour avoir lieu, conditions plus ou moins complexes suivant le type d'onde étudiée (scalaire/vectorielle) et le mode d'observation choisi (détecteur d'amplitude ou d'intensité, rapide ou lent...). On se contentera ici de la formulation simple suivante portant sur trois conditions :

Premièrement : que les deux ondes se superposent au point de l'espace étudié.

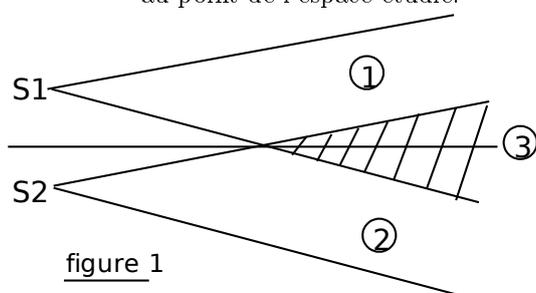


figure 1

L'observateur ou le détecteur doit donc être placé dans la **“zone d'interférence”**(3).

Deuxièmement : que les deux ondes aient la même fréquence ν (on dit qu'elles sont **“synchrones”**)⁵.

Troisièmement : que les deux ondes soient **“cohérentes entre elles”**, c'est-à-dire qu'elles partent “en même temps” des deux sources, ou avec un décalage “fixe” dans le temps (la phase relative entre les deux ondes en un point de l'espace est fixe et non aléatoire).

Afin de faciliter la réalisation des deuxièmes et troisièmes conditions, on utilise **une seule source** que l'on divise en deux parties de manière à fabriquer deux sources dites secondaires : pour les ondes sonores, on alimentera les deux haut-parleurs avec le même GBF, et en optique, on divisera le faisceau lumineux à l'aide d'un **bi-prisme de Fresnel**.

B Préparation

- Dessiner deux fonctions sinusoïdales du temps, de même pulsation, même amplitude et *en phase*. Donner leurs expressions mathématiques. Dessiner ensuite la somme de ces deux fonctions et donner son expression.
- Mêmes questions pour deux fonctions sinusoïdales *en opposition de phase*.
- L'intensité I d'une onde est proportionnelle au carré de son amplitude. Comparer, dans les deux cas, l'intensité des deux ondes de départ à celle de l'onde somme.
- Conclure. Dans quel cas les interférences sont-elles constructives ? Dans quel cas sont-elles destructives ?

Partie A Ondes sonores

Les ondes mécaniques ont besoin d'un milieu matériel pour se propager. Elles peuvent être **transversales** comme les rides à la surface de l'eau, ou **longitudinales** comme dans le cas de l'onde sonore.

A Préparation

Deux haut-parleurs sont espacés de 3 mètres. On place une sonde (microphone) en un point situé sur l'axe de l'un des deux haut-parleurs et à 2 mètres de celui-ci.

- Pour quelles fréquences le signal sonore est-il maximum en ce point ? Calculer le nombre total de fréquences audibles satisfaisant à cette condition⁶.

B Expérience

L'expérience est réalisée à l'aide de deux haut-parleurs alimentés par un même Générateur Basses Fréquences. L'étude du phénomène d'interférence se fera dans le plan horizontal, à l'aide d'une sonde (microphone) reliée à un oscilloscope.

- On fixe la fréquence d'émission du GBF à 1 000 Hz et on déplace la sonde dans la zone d'interférence. Que constate-t-on ? Interpréter.
- 5. En lumière blanche, seules les radiations de même couleur λ donneront lieu à des interférences visibles à l'œil.
- 6. On rappelle que le domaine de la gamme audible s'étend approximativement de 20 Hz à 20 kHz et que la vitesse de propagation du son est $V = 343$ m/s à température ambiante.

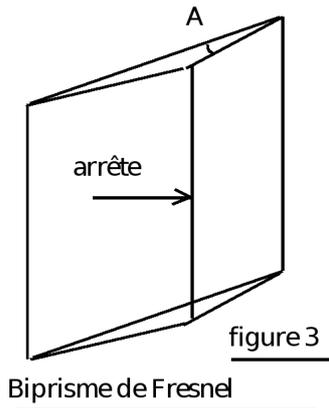


figure 3

Biprisme de Fresnel

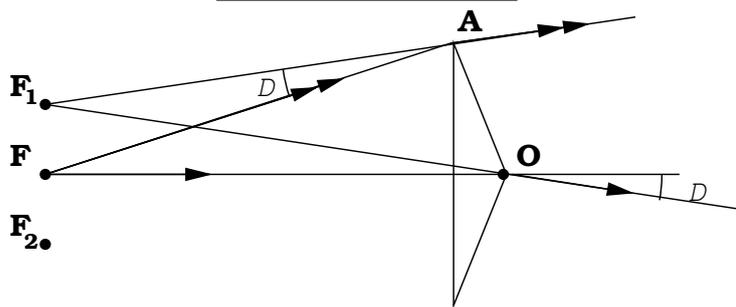


Figure 2: Biprisme de FRESNEL

- On fixe cette fois-ci la position de la sonde en un point de la zone d'interférence et on fait varier la fréquence de vibration des deux haut-parleurs. Que constate-t-on ? Interpréter.
- Vérifier les conclusions de l'exercice fait en préparation.

Partie B Interférences en Optique

A Interfrange

Dans le cas des manipulations d'optique, le plan d'observation sera parallèle à la base du bi-prisme au plan des sources cohérentes F_1 et F_2 , et éloigné de celui-ci d'une distance $D \gg a$ (voir Fig. 1)

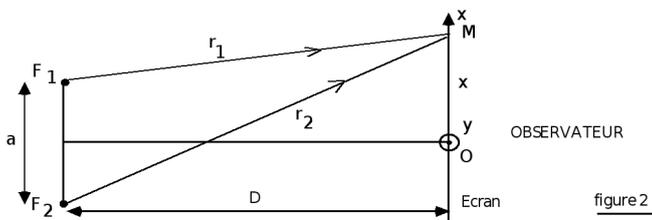


Figure 1: Interférences

- En supposant que les deux ondes sont en phase lorsqu'elles partent de F_1 et F_2 , exprimer la différence de marche δ entre les deux ondes en fonction de r_1 et r_2 . En déduire le retard temporel τ de l'une par rapport à l'autre et leur déphasage ϕ .

- Expliquer pourquoi l'éclairement est différent selon le point (valeur de x) du plan où l'on se place et donner l'allure de la courbe de l'intensité I en fonction de la position x .

En optique, on parle de « figure d'interférence ». Les lieux d'interférences constructives (resp. destructives) sont appelés « franges d'interférences » brillantes (resp. sombres). L'étude théorique montre que ces franges sont équidistantes. La distance entre deux franges brillantes (resp. sombres) est l'**interfrange**

$$i = \frac{\lambda D}{a}, \tag{1}$$

où λ est la longueur d'onde de la lumière monochromatique .

L'étude expérimentale qui suit a pour but de vérifier quantitativement cette relation.

B Biprisme de Fresnel

Le bi-prisme est constitué de deux prismes identiques en verre, d'angle A très petit, accolés par leurs bases et formant une arête verticale. Il donne de la fente-source F deux images virtuelles F_1 et F_2 qui constitueront les deux sources secondaires cohérentes. Les rayons issus de F qui frappent le premier (resp. le second) prisme en ressortent en semblant provenir de F_1 (resp. F_2). En première approximation, F_1 et F_2 sont dans le plan de F .

- Compléter le schéma de la figure 2 et déterminer la « zone d'interférence ».

Les angles étant petits, l'angle de déviation D est très voisin de $(n - 1)A$.

- Montrer que la distance $a = F_1F_2$ est égale à $a = 2.FO.\tan D$ et en déduire

$$a \approx 2.FO.(n - 1)A.$$

C Obtention de la figure d'interférence

On utilise, pour la première mesure, une lampe à vapeur de sodium qui émet essentiellement deux radiations jaunes très proches (doublet jaune du sodium) de longueur d'onde moyenne $\lambda = 589,3 \text{ nm}$.

Mise en place :

Placer la fente source tout contre la lampe et le bi-prisme à la distance $FO = 25 \text{ cm}$. En regardant à travers le biprisme, observer les deux sources secondaires F_1 et F_2 lorsque votre œil est aligné avec l'arête et la fente F .

Placer le viseur à une longueur de bras de la fente de telle sorte qu'on puisse éventuellement faire les réglages tout en gardant un œil dans le viseur.

Faire les 4 réglages suivants :

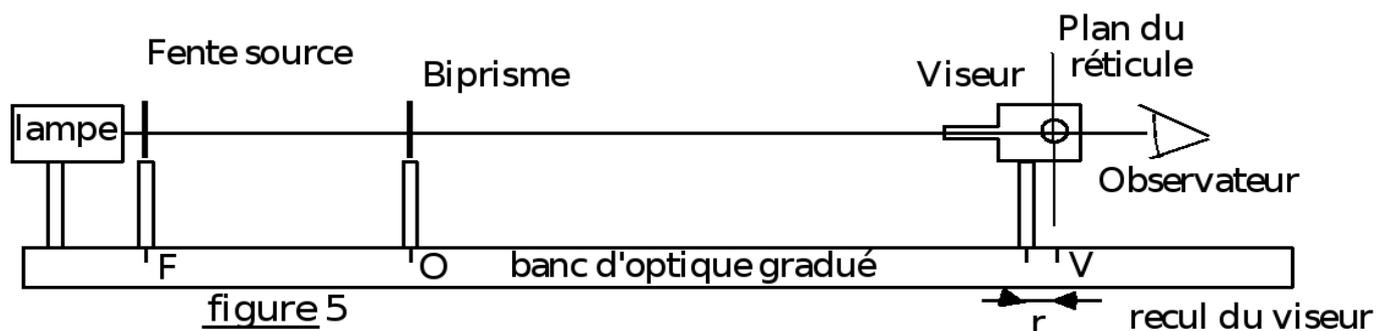


figure 5

Figure 3: Schéma de principe

1. **Alignement** : S'assurer que tous les éléments du montage sont **alignés** sur le banc et que le faisceau de la lampe est bien dans l'axe du banc. Vérifier, autant que nécessaire, le trajet de la lumière à l'aide d'une feuille blanche.
2. **Zone d'interférence** : Placer le viseur dans la zone d'interférence, de luminosité un peu **plus intense**. En regardant dans le viseur on distingue une structure de franges verticales, dont il faut améliorer la visibilité.
3. **Largeur de la fente source** : Régler la largeur de la fente qui doit être la **plus fine possible** tout en laissant passer suffisamment de lumière.
4. **Parallélisme** : Faire tourner la fente source (ou le biprisme) dans son plan de manière à obtenir le meilleur contraste, lorsque la fente source est **rigoureusement parallèle** à l'arrête du biprisme. Ce réglage est déterminant pour la qualité du résultat.

☞ En déduire l'interfrange i et compléter la première ligne du tableau 2

E Étude en fonction de λ

La lampe à vapeur de sodium est remplacée par une lampe halogène, qui produit une lumière blanche, devant laquelle on placera successivement des filtres interférentiels rouge, vert et bleu. Ceux-ci sélectionnent une longueur d'onde très précise, qui est inscrite sur le support du filtre avec sa précision.

Mise en place : Les filtres interférentiels sont **fragiles et coûteux** (300 euros pièce !). Il est **INTERDIT** de les retirer de leur support et de les toucher avec les doigts. Sans modifier le montage, remplacer la lampe à vapeur de sodium par la lampe halogène suivie d'un filtre et observer la figure d'interférences obtenue. Réajuster éventuellement le réglage.

Observations qualitatives

- ☞ Vérifie-t-on que les franges brillantes (resp. sombres) sont équidistantes. Définir l'interfrange i .
- ☞ Tout en regardant dans le viseur, éloigner celui-ci de la fente. Comment varie l'interfrange i lorsque la distance $D = FV$ augmente ? Était-ce prévisible ?

D Mesure de l'interfrange i .

Pour mesurer l'interfrange, il faut utiliser les réticules fixe et mobile du viseur ainsi que la vis micrométrique indiquant la position du réticule mobile **au centième de mm près**.

- ☞ Choisir une distance D permettant une mesure précise. **Attention** au "recul du viseur" : le plan d'observation est celui **des réticules**, il se trouve en retrait par rapport à l'index du pied d'une distance appelée "recul", indiquée sur chaque viseur (Fig. 3).
- ☞ Superposer les deux réticules et les positionner au centre d'une frange. Noter leur position initiale x_i . Décaler ensuite le réticule mobile de n interfranges (10 minimum) et noter sa position x_f .

☞ Toujours pour la même valeur D , mesurer l'interfrange correspondant aux radiations rouge, verte et bleue. Si le phénomène n'est pas assez visible (en particulier pour le bleu), élargir la fente source F pour laisser passer plus de lumière.

☞ Compléter le reste du tableau de valeurs.

☞ Tracer la courbe représentant i en fonction de λ . Commenter.

☞ La relation (1) est-t-elle vérifiée ?

☞ En déduire la distance a entre les deux fentes secondaires F_1 et F_2 .

☞ Comparer à la valeur trouvée par le calcul. Pour cela, on a mesuré précisément l'angle A du bi-prisme et son indice : $A = 0,49^\circ \pm 0,03$ et $n = 1,77 \pm 0,08$.

couleur et $\lambda(\text{nm})$	x_i (mm)	Δx_i (mm)	x_f (mm)	Δx_f (mm)	n	$i = \frac{x_f - x_i}{n}$ (mm)	Δi (mm)
Jaune							
Rouge							
Vert							
Bleu							

Table 2: tableau de mesures

F Interférences en lumière blanche

- ☞ Supprimer tout filtre interférentiel et observer la figure d'interférence en lumière blanche.
- ☞ Décrire ce que vous observez en faisant au besoin un dessin en couleur.
- ☞ Expliquer l'existence d'une frange blanche au centre, bordée de franges sombres, elles-mêmes suivies de couleurs, lorsque l'on s'éloigne progressivement du centre.
- ☞ Quand on est assez loin du centre, on trouve une zone appelée "blanc d'ordre supérieur". Expliquer.

F-1 Cohérence temporelle et cohérence spatiale

La lampe à vapeur de Sodium possède en fait un doublet jaune ($\lambda_1 = 589,0$ et $\lambda_2 = 589,6$ nm).

- ☞ Au bout de combien de franges à partir du centre prévoyez-vous le brouillage ? Est-ce conforme à ce que l'on observe ? Expliquer.
- ☞ Comparer la largeur de la figure d'interférences en lumière blanche avant brouillage à celle de la lampe à vapeurs de sodium (presque monochromatique). Interpréter.