Propriétés des ondes
Travaux Dirigés

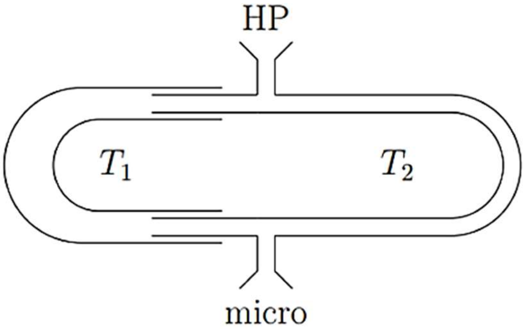
Questions de cours

En vérifiant que vous savez répondre à ces questions, vous contrôlez votre apprentissage du cours.

- Comment s'exprime le déphasage $\Delta\phi$ entre le signal reçu en un point d'abscisse x_1 et un point d'abscisse x_2 ? A quelle condition sur $d = x_2 - x_1$ les deux signaux seront-ils en phase, en opposition de phase ?
- Quelle est l'amplitude de l'onde résultante de la somme de deux ondes progressives sinusoïdales en un point M quelconque (la démonstration complète n'est pas toujours demandée ; par contre, il faut savoir poser le problème physique correctement, c'est-à-dire définir les deux ondes arrivant en M, dire que l'onde résultante est la somme des deux ondes et qu'on la cherche sous la forme d'une onde stationnaire). Interpréter le résultat en termes d'interférences constructives et destructives.
- Exprimer et exploiter la relation exprimant l'angle caractéristique de diffraction en fonction de la longueur d'onde et de la taille de l'ouverture (penser à faire un schéma).
- Décrire et interpréter qualitativement les observations correspondant à une manifestation de l'effet Doppler.

Exercice 1. Trombone de Kœnig (🕮)

Le trombone de Kœnig est un dispositif de laboratoire permettant de faire interférer deux ondes sonores ayant suivi des chemins différents. Un haut-parleur, alimenté par un générateur basses fréquences, émet un son de fréquence f = 1, 5 kHz.



Un microphone branché sur un oscilloscope enregistre le signal sonore en sortie.

En déplaçant la partie mobile du tuyau T_1, on fait varier l'amplitude du signal observé. Elle passe deux fois de suite par une valeur minimale lorsqu'on déplace T_1 de d = 11, 5 cm.

Q1. On note d_1 la distance entre le haut-parleur et le micro en passant par le tuyau T_1, et d_2 la distance en passant par le tuyau T_2.
De combien varie la différence de marche $\delta = d_1 - d_2$ lorsqu'on déplace la partie T_1 d'une distance d ?

Q2. Déterminer la valeur de la longueur d'onde de l'onde sonore dans cette expérience.

Q3. Déterminer la vitesse du son dans l'air à la température où l'expérience est réalisée.

Exercice 2. Amplitude résultant d'interférences

On considère deux sources qui émettent deux ondes progressives sinusoïdales, de même pulsation $\boldsymbol{\omega}$ et de phase à l'origine nulle. On note r_1 = distance S_1M et r_2 = distance S_2M. Pour simplifier les calculs, on considère que les amplitudes de $\boldsymbol{s_1}$ et $\boldsymbol{s_2}$ sont identiques. On a donc, au point M :

$$\boldsymbol{s_1(M,t) = A_0.\cos(\omega.t - k.r_1)} \quad \text{et} \quad \boldsymbol{s_2(M,t) = A_0.\cos(\omega.t - k.r_2)}$$

On rappelle que $\cos(p) + \cos(q) = 2.\cos\left(\frac{p+q}{2}\right).cos(\frac{p-q}{2})$

Q1. Exprimer le signal total $\boldsymbol{s(M,t) = s_1(M,t) + s_2(M,t)}$ au point M.

On le mettra sous la forme $\boldsymbol{s(M,t) = A.\cos(\omega t + \phi_0)}$. On donnera l'expression de l'amplitude $\boldsymbol{A}$ obtenue, en fonction de $\boldsymbol{A_0}$, $\boldsymbol{\lambda}$ et de $\boldsymbol{\delta = r_2 - r_1}$.

Q2. Retrouver alors la condition habituelle sur $\boldsymbol{\delta = r_2 - r_1}$ pour que les interférences soient destructives.

Q3. De même, retrouver la condition habituelle sur $\boldsymbol{\delta = r_2 - r_1}$ pour que les interférences soient constructives.

Exercice 3. Diffraction d'un laser

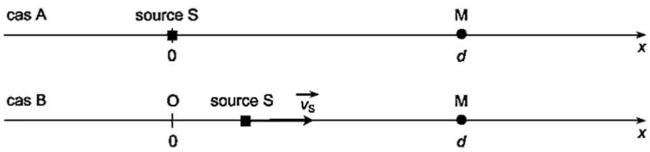
Un laser He-Ne ($\boldsymbol{\lambda} = 632{,}8\,nm$) est envoyé sur une fente fine de largeur $\boldsymbol{a}$.

Q1. Pour quelle valeur de $\boldsymbol{a}$ la tâche centrale de diffraction sur un écran placé à $\boldsymbol{D}$ = 1,50m de la fente vaut-elle $\mathbf{100} \times \boldsymbol{a}$, critère pour une diffraction importante et bien visible ? Comparer alors $\boldsymbol{a}$ et $\boldsymbol{\lambda}$.

Une fente et un obstacle de même taille donne la même figure de diffraction (théorème de Babinet). Un cheveux placé dans le même faisceau donne, toujours à $\boldsymbol{D}$ = 1,50 m, une tâche centrale de largeur $\boldsymbol{L}$ = 3,8 cm.

Q2. Que peut-on en déduire ?

Exercice 4. Mouvement relatif d'une source et d'un détecteur



Nous nous intéressons dans un premier temps au changement de fréquence associé au mouvement relatif d'une source sonore S et d'un détecteur placé au point M. Le référentiel d'étude est le référentiel terrestre dans lequel le détecteur est immobile. Une source S émet des « bips » sonores à intervalles de temps réguliers dont la période d'émission est notée $\boldsymbol{T_0}$. Le signal sonore se propage à la célérité $\boldsymbol{v_{son}}$ par rapport au référentiel terrestre.

Cas A : la source S est immobile en $\boldsymbol{x}$ = 0 et le détecteur M, situé à la distance $\boldsymbol{d}$, perçoit chaque bip sonore avec un retard lié à la durée de propagation du signal.

Q1. Définir par une phrase, en utilisant l'expression « bips sonores», la fréquence $\boldsymbol{f_0}$ de ce signal périodique.

Q2. Comparer la période temporelle $\boldsymbol{T}$ des bips sonores perçus par le détecteur à la période d'émission $\boldsymbol{T_0}$.

Cas B : la source S, initialement en $\boldsymbol{x}$ = 0, se déplace à une vitesse constante $\boldsymbol{v_s}$ suivant l'axe Ox en direction du détecteur immobile. La vitesse $\boldsymbol{v_s}$ est inférieure à la célérité $\boldsymbol{v_{son}}$. On suppose que la source reste à gauche du détecteur.

Le détecteur perçoit alors les différents bips séparés d'une durée $T' = T_0\left(1 - \frac{V_S}{V_{son}}\right)$

Q3. Indiquer si la fréquence $\boldsymbol{f'}$ des bips perçus par le détecteur est inférieure ou supérieure à la fréquence $\boldsymbol{f_0}$. Justifier.

Exercice 5. Écoute musicale et interférences

La qualité de l'écoute musicale que l'on obtient avec une chaîne hi-fi dépend de la manière dont les enceintes sont disposées par rapport à l'auditeur. En particulier, il faut absolument éviter la configuration où un mur se trouve à distance $\boldsymbol{D}$ trop courte derrière l'auditeur. Cet exercice a pour but de comprendre pourquoi.

Supposons l'onde issue de l'enceinte harmonique de fréquence $\boldsymbol{f}$. Elle se réfléchit sur le mur sans aucun déphasage pour la surpression, grandeur à laquelle est sensible l'oreille de l'auditeur. On note $v_{\text{son}} = 343 \text{ m.s}^{-1}$ la vitesse du son dans l'air.

Q1. En vous aidant d'un schéma clair, exprimer le décalage temporel $\Delta\boldsymbol{\tau}$ qui existe entre les deux ondes arrivant dans l'oreille de l'auditeur, celle provenant directement de l'enceinte et celle s'étant réfléchie sur le mur.

Q2. En déduire le déphasage $\Delta\boldsymbol{\varphi}$ entre les deux ondes.

Q3. Expliquer pourquoi il existe un risque de diminution de l'amplitude perçue par l'auditeur pour certaines fréquences.

Q4. Exprimer ces fréquences en fonction d'un entier $\boldsymbol{p}$. Quelle condition doit vérifier la distance $\boldsymbol{D}$ pour qu'aucune d'entre elles ne soit dans le domaine audible ? Commenter.

Q5. Expliquer qualitativement pourquoi on évite l'effet nuisible en éloignant l'auditeur du mur. Pourquoi recouvrir le mur d'un revêtement adéquat aura-t-il le même effet ?

On cherche maintenant à mesurer l'efficacité d'un tel revêtement. Un micro sensible à la surpression est placé à une distance $\boldsymbol{D}$ du mur, puis un haut-parleur envoie un signal appelé bruit blanc dont le spectre contient toutes les fréquences avec la même amplitude. La courbe obtenue est représentée ***figure 1***. D'allure très caractéristique, elle est appelée « courbe en peigne ». Elle représente la différence de niveau sonore en décibel en fonction de la fréquence, cette différence $\Delta\boldsymbol{L}_{\text{dB}}$ étant relié à l'amplitude $\boldsymbol{A}$ du signal sonore par

$$\Delta\boldsymbol{L}_{\text{dB}} = 20.\log\left(\frac{\boldsymbol{A}}{\boldsymbol{A}_{\text{réf}}}\right)$$

où $\boldsymbol{A}_{\text{réf}}$ est une amplitude de référence.

Q6. Calculer numériquement la distance $\boldsymbol{D}$.

Q7. Le traitement vous semble-t-il efficace ? Justifier.

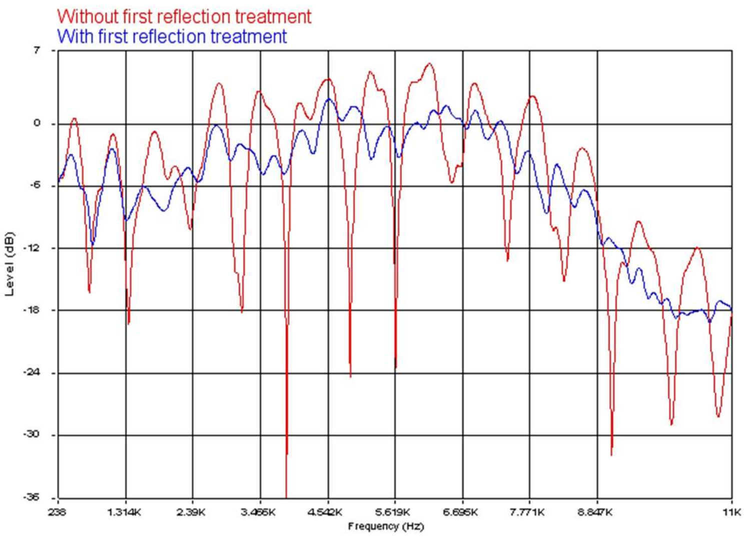


Figure 1 – Courbe en peigne enregistrée à distance $\boldsymbol{D}$ du mur. Les échelles sont de 1,077 kHz/div en abscisse et 6 dB/div en ordonnée. *Source : http://realtraps.com/*

Exercice 6. Interférences sonores (📖)

Deux émetteurs considérés comme ponctuels, situés en S_1 et S_2, émettent des ondes sonores harmoniques de même fréquence $\boldsymbol{f} = 1{,}0\ \mathrm{kHz}$ et en phase. Un petit micro *M* peut être déplacé le long de l'axe Ox : il délivre une tension proportionnelle au « signal sonore » reçu au point *M* d'abscisse $\boldsymbol{x_M}$.

Les signaux émis par les sources S_1 et S_2 sont identiques :

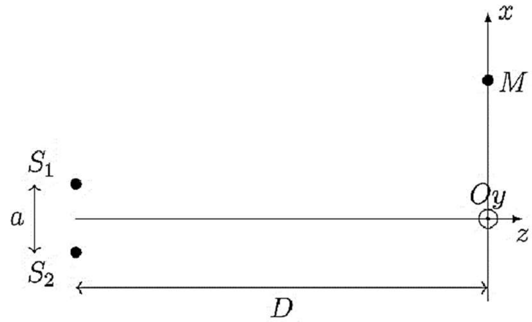
$$s_1(S_1, t) = s_2(S_2, t) = A.\cos(\omega.t)$$

Au point *M*, ces deux signaux s'écrivent :

$$s_1(M, t) = A_1.\cos(\omega.t - \phi_1(M))$$

$$s_2(M, t) = A_2.\cos(\omega.t - \phi_2(M))$$

La célérité du son dans l'air est $\boldsymbol{v}_{\text{son}} = 340\ \mathrm{m.s^{-1}}$.



Q1. Exprimer puis calculer la longueur d'onde $\boldsymbol{\lambda}$ des ondes émises par les sources.

Q2. Expliquer pourquoi en réalité $\boldsymbol{A_1} \neq \boldsymbol{A}$ et $\boldsymbol{A_2} \neq \boldsymbol{A}$. Quelle hypothèse nous permet de considérer $\boldsymbol{A_1} = \boldsymbol{A_2} = \boldsymbol{A}$?

Dans la suite on prendra $\boldsymbol{A_1} = \boldsymbol{A_2} = \boldsymbol{A}$.

Q3. Que représentent les termes $\boldsymbol{\phi_1}(M)$ et $\boldsymbol{\phi_2}(M)$? Les exprimer notamment en fonction des distances S_1M et S_2M.

Q4. Exprimer le déphasage $\Delta\boldsymbol{\phi} = \boldsymbol{\phi_2}(M) - \boldsymbol{\phi_1}(M)$ en *M* entre les deux ondes issues de S_1 et S_2 en fonction de la différence de marche $\boldsymbol{\delta}(M) = S_2M - S_1M$ et de $\boldsymbol{\lambda}$.

Q5. À quelle condition portant sur la différence de marche $\boldsymbol{\delta}$ les interférences sont-elles destructives ?

Q6. Dans l'hypothèse où $\boldsymbol{x_M} \ll \boldsymbol{D}$ et $\boldsymbol{a} \ll \boldsymbol{D}$, il est possible de montrer que

$$\boldsymbol{\delta}(M) = \frac{a.\boldsymbol{x_M}}{D}$$

En déduire les positions du micro pour lesquelles les interférences sont destructives. L'amplitude du son reçue par le micro dans ces positions est-elle minimale ou maximale ?

Q7. Retrouver l'expression de la différence de marche en utilisant le théorème de Pythagore et le développement limité de la fonction racine carrée en 1 :

$$\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{x}{2} \quad \text{quand} \quad x \ll 1.$$

Exercice 7. Contrôle radar (étude documentaire)

Activité proposée par Nathalie FONTAINE – Académie de Caen.

Document 1 : Principe de fonctionnement d'un radar fixe

Le radar MESTA 210 permet de mesurer la vitesse des véhicules en utilisant l'effet Doppler. Le radar de contrôle routier émet une onde électromagnétique au moyen d'une antenne directive et mesure la différence de fréquence entre l'onde émise et l'onde réfléchie par la cible. Le décalage en fréquence $\boldsymbol{\Delta f}$ est proportionnel à la vitesse $\boldsymbol{v}$ du véhicule et au cosinus de l'angle $\boldsymbol{\alpha}$ formé par le vecteur-vitesse du véhicule et l'axe de rayonnement de l'antenne.

$$\Delta f = 2v.\frac{\cos\alpha}{\lambda}$$ avec λ longueur d'onde d'émission en mètre.

Document 2 : Quelques caractéristiques du radar MESTA 210

Fréquence d'émission : 24,125 GHz
Détection et mesure de vitesse jusqu'à 300 km/h
Portée de l'ordre de 50 mètres

Document 3 : Législation

Réglementairement, l'appareil doit être tourné à 25° par rapport à l'axe de la route et dans le cas contraire, le moindre degré de différence peut faire varier la vitesse enregistrée.
Lors du calcul de la vitesse d'un véhicule, une marge de 5 km.h^{-1} pour les vitesses inférieures à 100 km.h^{-1} ou de 5 % de la vitesse pour les vitesses au-dessus de 100 km.h^{-1} est prise en compte, toujours à l'avantage du conducteur.

Donnée : vitesse de propagation des ondes électromagnétiques c = 3,00.10^8 m.s^{-1}

Problématique

Un véhicule est contrôlé avec un décalage en fréquence mesuré de 5,35 KHz sur une autoroute où la vitesse est limitée à 130 km.h^{-1}. Le conducteur de la voiture sera-t-il sanctionné?

Quelle serait l'influence d'une erreur de réglage de 5° sur l'angle ?

Exercice 8. Application de l'effet Doppler à l'astrophysique

La vitesse radiale d'une étoile ou d'un autre objet lumineux éloigné peut être mesurée précisément en prenant un spectre à haute-résolution et en comparant les longueurs d'onde mesurées de raies spectrales connues aux longueurs d'onde de ces mêmes raies mesurées en laboratoire. Par convention, une vitesse radiale positive indique que l'objet s'éloigne (on parle de décalage vers le rouge, redshift en anglais) et une vitesse négative que l'objet se rapproche (décalage vers le bleu, blueshift en anglais).

Le but est ici de calculer cette vitesse pour l'étoile HD 2665, une géante jaune de la constellation de Cassiopeia (Cassiopée).

Protocole :

- ☐ Se connecter au site internet http://atlas.obs-hp.fr/elodie et afficher le profil spectral de l'étoile HD 2665 en entrant HD 2665 puis en cliquant sur Get Spectra.

- ☐ Ensuite, sur la ligne HD 002665 cliquer sur <u>view_spec</u> (le 1er) pour faire apparaître le spectre de l'étoile.
- ☐ On cherche à déterminer la longueur d'onde $\lambda_{spectre}$ de la raie H_a sur ce spectre dont la valeur de référence est $\lambda_{référence}$ = 6562,6.10^{-10} m. Pour cela, zoomer pour voir la raie H_a en commençant par l'encadrement 6500.10^{-10} m – 6600.10^{-10} m.
- ☐ Zoomer de nouveau jusqu'à pouvoir déterminer précisément $\lambda_{spectre}$ de la raie H_a.

<u>Questions</u> :

Q1. Expliquer pourquoi la valeur trouvée est différente de celle de référence. Est-ce un blueshift ou un redshift ?

Q2. Cette étoile s'éloigne-t-elle ou bien s'approche-t-elle de la Terre ?

Q3. Pour cette longueur d'onde, déterminer la valeur de la vitesse radiale $\boldsymbol{v}$ de l'étoile par rapport à la Terre à partir de la formule de Doppler-Fizeau : $v = -c.\frac{\lambda_{réf}-\lambda_{spectre}}{\lambda_{réf}}$ où $\boldsymbol{c}$ représente la célérité de la lumière dans le vide et $\boldsymbol{\lambda_{spectre}}$ la longueur d'onde de la raie de l'hydrogène obtenue à partir du spectre de l'étoile.

Q4. Comparer la valeur obtenue à celle fournie par le logiciel. Pour cela, revenir sur la page précédente, cliquer sur le **S** (troisième colonne) de la ligne correspondant à HD2665 puis relever la vitesse radiale (vitesse d'éloignement) de l'étoile.

Notions et contenus	Capacités exigibles	Dans les exercices / le cours
Phénomène d'interférences Interférences entre deux ondes acoustiques ou mécaniques de même fréquence.	Exprimer les conditions d'interférences constructives ou destructives. Déterminer l'amplitude de l'onde résultante en un point en fonction du déphasage.	Application 1, Exercices 1, 5 et 6 Exercice 2, 5 et 6
Différence de chemin optique. Conditions d'interférences constructives ou destructives.	Relier le déphasage entre les deux ondes à la différence de marche. Établir l'expression littérale de la différence de chemin (*différence de marche*) entre les deux ondes. **Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour visualiser et caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes.**	Section 1.3 Application 1 Exercice 1,5 et 6 TP 2 Corde de Melde
Phénomène de diffraction. Diffraction d'une onde par une ouverture: conditions d'observation. Angle caractéristique de diffraction.	Exploiter la relation exprimant l'angle caractéristique de diffraction en fonction de la longueur d'onde et de la taille de l'ouverture.	Application 3 Exercice 3
Effet Doppler. Décalage Doppler.	Décrire et interpréter qualitativement les observations correspondant à une manifestation de l'effet Doppler. Établir l'expression du décalage Doppler dans le cas d'un observateur fixe, d'un émetteur mobile et dans une configuration à une dimension. Exploiter l'expression du décalage Doppler dans des situations variées utilisant des ondes acoustiques ou des ondes électromagnétiques.	Exercices 4, 7 et 8. Application 4 Exercices 4,7 et 8