

### 1. Question ouverte

Suite à la démonstration du cours, montrer qu'une hypothèse isotherme (au lieu d'adiabatique réversible) ne peut convenir pour l'expression de la forme littérale de la célérité du son dans l'air.

### 2. Etude de l'effet Doppler en optique

On peut lire :

"L'effet Doppler permet de calculer la valeur de la vitesse **radiale**<sup>1</sup> d'une étoile en comparant les longueurs d'onde de son spectre d'absorption à celles d'un spectre de référence. Lorsqu'une étoile ou une galaxie s'éloigne de la Terre, on observe un décalage vers les grandes longueurs d'onde (vers le rouge pour les raies du visible); ce **décalage vers le rouge**<sup>2</sup> est appelé "redshift". Inversement, lorsqu'une étoile ou une galaxie se rapproche de la Terre, on observe un décalage vers les petites longueurs d'onde (vers le bleu pour les raies du visible); ce décalage vers le bleu est appelé "blueshift". "

Commenter les notes 1 et 2 et comparer au cas de l'acoustique.

### 3. Célérité du son dans l'air à différentes températures

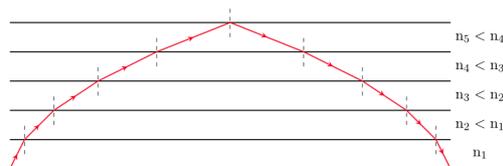
On considère la célérité obtenue dans le cours sous la forme  $c = \sqrt{\frac{\gamma RT_0}{\mathcal{M}}}$ .

3. 1 Comment une variation de température joue sur  $c$ ?
3. 2 Quel est le pourcentage de variation de  $c$  pour  $\frac{\Delta T}{T_0} = 0,01$ ?
3. 3 Une autre variation est possible, autre que la température : comment expliquer le changement de voix par l'usage d'hélium ?

### 4. Incidence oblique d'une onde sonore sur une interface

4. 1 Montrer que les équations en  $p$  et  $v$  permettent, dans le cas d'une onde arrivant obliquement (avec un angle  $\theta$  par rapport à la normale) sur une interface entre deux milieux d'impédance  $Z_1$  et  $Z_2$ , d'obtenir des lois similaires aux lois de la réflexion et de la réfraction en optique géométrique.
4. 2 On appelle mirages des phénomènes optiques ou acoustiques lors desquels la lumière ou le son ne semble pas se propager en ligne droite comme à l'accoutumée.

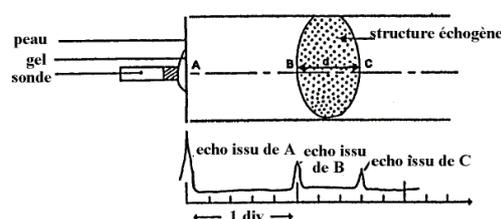
Dans les milieux inhomogènes, l'indice de réfraction n'est pas le même partout. Si on prend par exemple une couche d'air située au dessus de la mer, la partie de la couche très proche de l'eau est plus froide que la partie supérieure de la couche. L'indice de réfraction dépendant de la masse volumique (loi de Glastone :  $n - 1 = k\rho$ , avec  $k$  une constante), et l'air froid étant plus dense que l'air chaud, l'indice de réfraction décroît avec l'altitude. Décrire les différents types de mirages en optique et en acoustique en fonction du signe du gradient de température.



### 5. Echographie

Une sonde ultrasonore émet des "salves" ultrasonores de très courte durée  $t = 1\mu s$ . La même sonde enregistre les échos renvoyés par les surfaces de séparation des différents milieux, sur un écran d'oscilloscope dont la base de temps est réglée à  $50\mu s / \text{div}$ .

- a) D'après l'oscillogramme ci-dessous, calculer la durée qui s'écoule entre la réception des échos renvoyés par les parois de la structure échogène observée dans les tissus mous.
- b) Calculer la dimension  $d$  dans le plan d'incidence particulier de la figure, de la structure échogène observée dans les tissus mous.
- c) A quoi sert le gel ?



## 6. Interférences acoustiques

a) Une salle de théâtre génère, de part et d'autre des coulisses situées derrière la scène, une onde sonore. On assimilera les coulisses à un tunnel de longueur  $L$  et les ondes sonores à des ondes planes monochromatiques de pulsation  $\omega$  de direction de propagation l'axe du "tunnel". On a donc deux sources, situées en A  $x = 0$  et en B  $x = L$ , et qui émettent respectivement un signal d'amplitude  $s_1 \cos(\omega t)$  et  $s_2 \cos(\omega t + \phi)$ . En considérant que l'oreille humaine n'est sensible qu'à la valeur quadratique moyenne de l'amplitude sur un grand nombre de période, déterminez l'intensité sonore en tout point des coulisses. L'expérience du "tube de KUNDT" est l'analogie de ce phénomène.

b) Les sources A et B sont audibles depuis la salle en un point M éloigné de telle sorte que l'on peut considérer AB faible devant la distance  $r = OM$  où O est le milieu de AB. Discuter de l'intensité perçue en fonction de la position de M.

## 7. Miroir de Lloyd (analogie entre acoustique et optique)

Un bateau en mer à 10km de la côte veut capter une émission radio FM de fréquence 100MHz sur une antenne placée à une distance  $z$  de la surface de l'eau. Le faisceau parallèle provenant de l'émetteur situé sur la côte se réfléchit en partie sur la mer en  $I$  : on admet que l'onde subit un déphasage de  $\pi$  au point  $I$ . La mer est calme. Pour quelle raison l'émission radio est-elle mal perçue quand l'émetteur est situé à une hauteur de 10m et la perception bien meilleure quand celui-ci se trouve sur une colline à une hauteur de 700m? On montrera que la différence de marche géométrique vaut  $\Delta = 2z \sin \theta$ . Montrer l'analogie qu'il y a en acoustique.

## 8. Couche antireflet

On considère une onde se propageant dans trois milieux successifs d'impédances  $Z_1$ ,  $Z_2$  et  $Z_3$ . Quelle doit être la condition pour minimiser la réflexion sur la première interface?

## 9. Pavillon acoustique

La section de ce pavillon  $S(x)$  dépend de la variable axiale  $x$  le long de la direction de propagation de l'onde. Montrer que cela permet de réaliser une adaptation d'impédance qui permet le transfert maximum d'énergie entre les deux milieux connectés par le pavillon.

## 10. Silencieux

On considère une onde plane progressive dans l'air guidée par un tube de section  $S_1$ . Cette section devient brutalement  $S_2 > S_1$  en  $x = 0$ . Expliquer que ce système est la base d'un silencieux pour l'échappement des gaz brûlés d'un moteur à combustion interne.

## 11. Résonateur acoustique

### 11.1 Cas d'un verre rempli en partie d'eau

En tapant avec une petite cuillère sur un verre d'eau, on met en vibration la colonne d'air de hauteur  $L$ .

- justifier que la fréquence du son émis est  $f = \frac{c}{4L}$ . On donne la vitesse du son dans l'air  $c = 340\text{m/s}$
- à quelle note correspond une hauteur de 48mm?
- comment faire pour obtenir une note plus aigüe?

### 11.2 résonateur de Helmholtz

On considère une sphère creuse de volume  $V$  avec un trou surmonté d'un petit cylindre de longueur  $\ell$  et de section  $s$ . Calculer la fréquence de résonance de ce système.

### 11.3 cas d'une bouteille de vin

Calculer la fréquence de résonance pour un col de  $\ell = 6,5\text{cm}$ ,  $s = 2,5\text{cm}^2$  et  $V = 75\text{cL}$

## 12. Clairon et trompette

On trouve comme description sur Internet :

"Sous sa forme actuelle, le clairon traditionnel français en *sib* a été inventé en 1822 par le fabricant Antoine Courtois. Le nom même désignait, au Moyen Âge, un instrument à vent similaire. C'est un instrument d'ordonnance de l'infanterie et de la marine, parfois repris par les musiques militaires, notamment par les cliques (formations uniquement composées, en France, de tambours et de clairons).

Le clairon ne possédant aucun mécanisme (clef, piston ou coulisse) pour modifier sa tonalité de base, le joueur de clairon est limité aux harmoniques naturelles de l'instrument. La note fondamentale est le si bémol (*sib*(1)), qui pour l'instrumentiste correspond au do Pédale (du fait de sa tonalité en *sib*), et est d'ailleurs assez inaccessible. La gamme commence donc sur la deuxième harmonique; en réalité, la majorité des pièces jouées au clairon n'utilisent que les 4 notes *fa*(3), *sib*(3), *ré*(4) et *fa*(4) (notes données en ut)."

### 12.1 Peut-on déduire de ces données la longueur d'un clairon? De son tube?

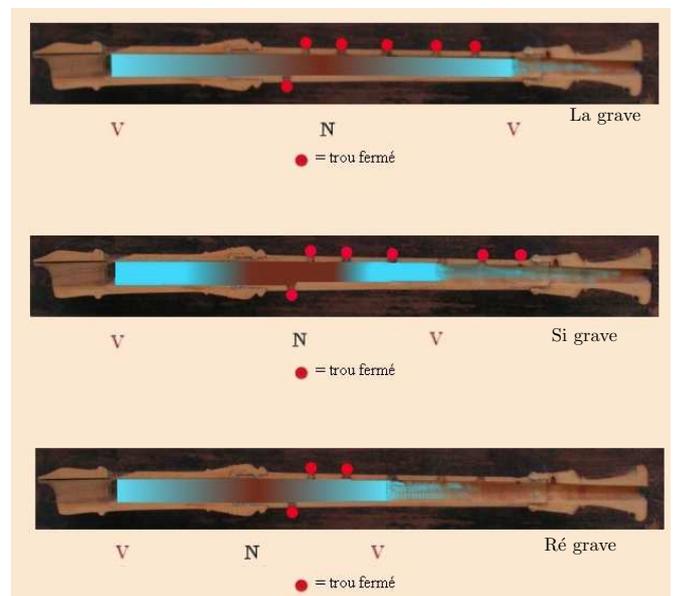
12. 2 Puisqu'il est indiqué "le joueur de clairon est limité aux harmoniques naturelles de l'instrument", comment peut se faire le changement de note ?
12. 3 Montrer qu'il est impossible de jouer toute la gamme avec un clairon.
12. 4 La différence avec une trompette est qu'elle est composée de 3 pistons qui permettent d'allonger le tube de la trompette en déviant la colonne d'air dans d'autres tubes via une coulisse (le piston du milieu allonge la longueur de la trompette de 6 %, le piston proche de l'embouchure allonge de 12% et le dernier allonge de 18%). Quand on appuie sur un piston, la note devient-elle plus grave ou plus aigüe ?
12. 5 Montrer que l'on peut jouer toute la gamme avec une trompette.

### 13. Tube, flûte, flûte de pan

13. 1 Cas de la flûte à bec (modélisable par un tube ouvert aux deux extrémités)

Aux extrémités A et B la pression demeure invariable (noeud de pression) . La longueur du tuyau est  $L$ , la célérité du son dans l'air est  $c$ .

- (a) Quelle longueur faut-il choisir pour que le son le plus grave (son fondamental) émis par l'instrument soit de fréquence :  
 $f_0 = 264Hz$  (note ut3) ?
- (b) On perce un trou à la distance  $L'$  de l'embouchure. On y provoque ainsi un noeud de pression. Quelle est la fréquence  $f'$  du son ainsi renforcé ? On admettra que seule la portion de tuyau comprise entre l'embouchure et le trou est le siège d'ondes stationnaires stables.
- (c) Les fréquences correspondant à la gamme débutant par une note de fréquence  $f_0$  sont proportionnelles aux nombres : 1 ; 9/8 ; 5/4 ; 4/3 ; 3/2 ; 5/3 ; 15/8 Où doit-on pratiquer des trous pour que la flûte donne les sept notes de la gamme d'ut3 ?
- (d) Commentez les schémas ci-contre



13. 2 Flûte de pan

Cette flûte consiste en une série de tuyaux de longueurs différentes qui sont maintenus ensemble par des ligatures (voir figure ci-dessous). Une extrémité de chaque tuyau est à l'air libre, l'autre (le fond) est fermée. Le joueur souffle à l'extrémité d'un tuyau afin d'émettre un son.

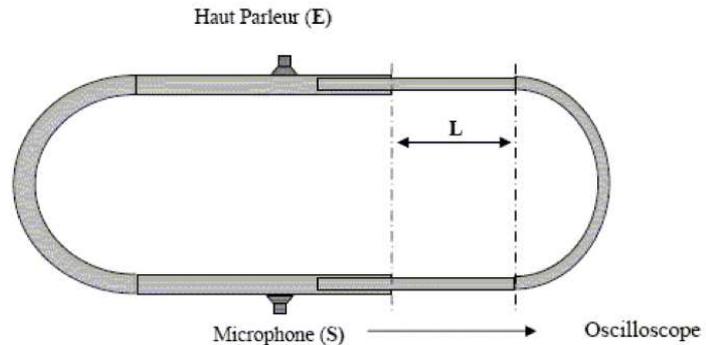
- (a) Quel corps est soumis à une vibration ?
- (b) Pour une longueur d'onde sonore produite de 1,2m, quelle doit être la longueur d'un tube pour que ce soit le mode fondamental ?
- (c) Les fréquences des harmoniques sont des multiples impaires ou paires ou quelconques de la fréquence du fondamental ?
- (d) Le passage de la note  $n$  à la note suivante  $n+1$  correspond à un demi-ton. Déterminer la relation entre les longueurs  $L_{n+1}$  et  $L_n$  des tuyaux permettant de jouer une gamme tempérée ?
- (e) Sur la photo ci-contre, expliquer la forme induite par les extrémités des tubes



**14. Interféromètre de Michelson et trombone de KOENIG**

14. 1 Trombone de Koenig

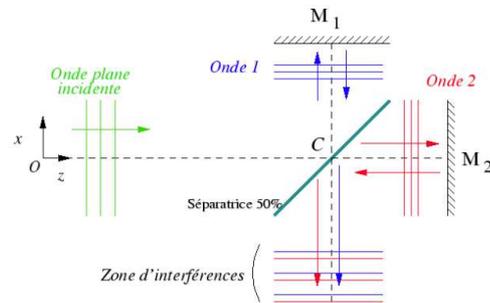
Un trombone de Koenig est formé de deux tubes coudés, dont l'un est fixe et muni de deux ouvertures, et l'autre coulisse. Une source sonore est placée devant une ouverture et un microphone relié à une interface d'acquisition informatisée devant l'autre. Le déplacement  $L$  du tube coulissant est mesuré avec une règle graduée.



- (a) Expliquez pourquoi le microphone reçoit deux ondes sonore alors qu'il n'y a qu'un seul haut parleur .
- (b) Les deux parcours sont exactement de même longueur lorsque  $L = 0$ . Quelle est la différence de marche entre les deux ondes reçues par le micro pour une valeur de  $L$  quelconque ?
- (c) Décrire ce qui se passe lorsque l'on augmente  $L$  à partir de  $L = 0$  ?
- (d) Pour  $L = 0$  la courbe observée sur l'écran de l'ordinateur a une amplitude maximale. Lorsque  $L$  augmente progressivement, l'amplitude diminue, devient nulle puis augmente jusqu'à être de nouveau maximale. Elle est pour la 3eme fois maximale pour  $L = 30$  cm. En déduire la longueur d'onde  $\lambda$

14. 2 Interféromètre de type Michelson

L'appareil fonctionne sur le même principe : la lumière parcourt deux voies différentes à cause de la lame semi-réfléchissante. La moitié de l'énergie se réfléchit sur le miroir 1 et l'autre moitié sur le miroir 2.



- a) Décrire la différence de phase entre les deux rayons émergeant du dispositif.
- b) Quelle variation minimale théorique de longueur peut-on mesurer grâce à cet appareil, par exemple dans le cas d'un miroir M1 fixe et d'un miroir M2 mobile ?
- c) Comparer au cas acoustique

**15. Onde acoustique sphérique**

L'équation de d'Alembert pour l'onde sonore est  $\Delta p - \mu_0 \chi_S \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$  avec  $\Delta f(r, \theta, \phi) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial f}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 f}{\partial \phi^2}$  qui se simplifie ici en  $\Delta f(r, \theta, \phi) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial f}{\partial r} \right)$

15. 1 pourquoi cette simplification ?

15. 2 Montrer que l'on peut donc en déduire  $\Delta p(r, t) = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 (r.p)}{\partial r^2}$

Solution :  $\Delta p(r, t) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial (r.p)}{\partial r} - r.p \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 (r.p)}{\partial r^2}$  CQFD

15. 3 En utilisant une solution de cette équation de d'Alembert dans l'une des équations caractéristiques comme  $\mu_0 \frac{\partial \vec{p}}{\partial t} = -\vec{grad} p$ , montrer que  $v$  peut s'écrire comme la somme de deux termes : un terme de "champ proche" et un autre de "champ lointain" (onde plane)