Physique Générale C

Semestre d'automne (11P090)
Notes du cours basées sur le livre
Physique
de Eugene Hecht, éditions De Boeck

Chapitre 19

Enseignante:
Anna Sfyrla

Assistant(e)s:
Mireille Conrad
Tim Gazdic
Jean-Marie Poumirol
Rebecka Sax
Marco Valente

Bibliographie

[1] Eugene Hecht, Physique, éditions De Boeck.
[2] Eugene Hecht, College Physics, Schaum's outlines.
[3] Randall D. Knight, Physics for Scientists and Engineers, Pearson.
[4] Yakov Perelman, Oh, la Physique!, Dunod.

Table des matières

19

Le son

L'idée que le son est un phénomène ondulatoire est très ancienne. L'onde sonore est longitudinale car elle se propage dans des fluides qui n'ont aucune raideur. Une onde mécanique transversale ne peut donc pas s'y propager car un fluide ne donne pas prise au cisaillement. Comme la matière ne se déplace pas avec l'onde, la vitesse de cette dernière peut être très grande. Le son se propage dans tout milieu qui peut réagir élastiquement. La région entre source et détecteur doit contenir une quantité de matière suffisante pour transmettre la modulation: Le son ne se propage pas dans le vide mais seulement dans un milieu matériel.

Dans ce chapitre, l'accent est mis sur la notion physique du son, onde élastique longitudinale. Les idées de base s'appuient quand même sur notre expérience sensorielle. Nous allons alors relier à des grandeurs physiques les notions physiologiques de hauteur, intensité et timbre des sons.

19.1 Les ondes sonores

Considérons un haut-parleur soumis à un signal sinusoïdal. Le cône flexible du haut-parleur vibre sinusoïdalement et produit dans l'air environnant, un *son simple*; c'est une série de couche de condensation et de raréfaction (figure 19.1). La variation résultante de pression à partir de la pression d'équilibre ou **pression acoustique** qui constitue les ondes sonores est assez faible.

Contrairement aux ondes se propageant le long d'une corde, les ondes de compression sont difficiles à visualiser directement. Cependant, dans le cas d'une onde qui se propage dans une direction O_x, nous pouvons représenter graphiquement le déplacement des particules du milieu (positif s'il est dans le sens de propagation et négatif dans le cas contraire) en fonction de la position x du point du milieu. Dans le cas d'une onde de compression d'une seule fréquence, la courbe représentative est une sinusoïde. Nous aurions pu aussi représenter graphiquement la masse volumique ou la pression acoustique dans le milieu en fonction de x et les courbes seraient aussi sinusoïdales (figure 19.2). Cette représentation est utile quand il s'agit d'instruments à vent.

Comme la pression acoustique P_G, en un point donné du milieu, peut être détectée par un microphone et observée facilement à l'aide d'un oscilloscope, une représentation graphique de P_G serait préférable. À titre d'exemple, la figure 19.2 montre le son engendré par un diapason.

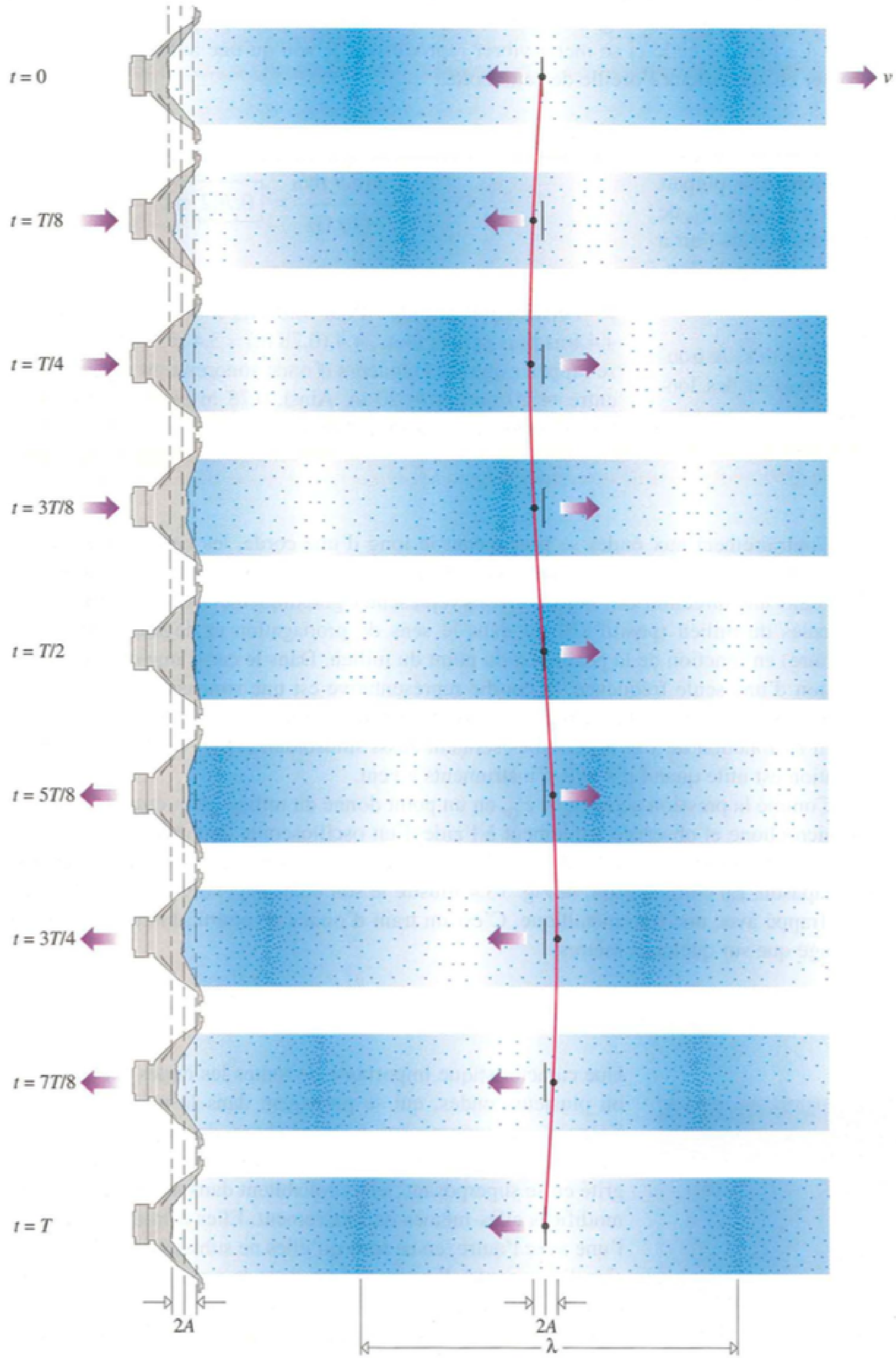

Figure 19.1: Onde sonore engendrée par un haut-parleur. Noter que le cône du haut-parleur balaie une distance totale égale à 2A. Chaque atome d'air oscille aussi sur un segment de longueur $2A$. Comparer cette distance à la longueur d'onde λ.

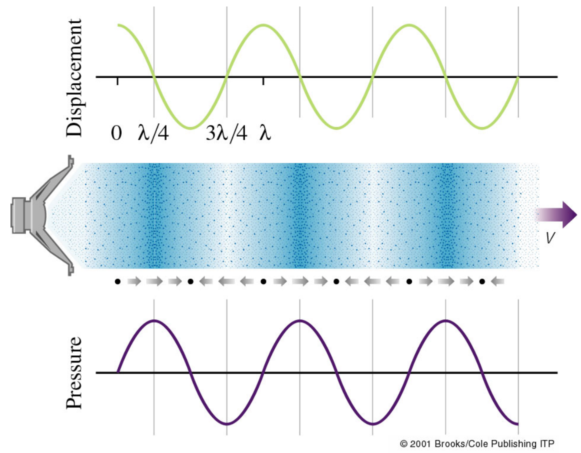

Figure 19.2: Dans le cas d'une onde sonore sinusoïdale, là où la pression acoustique est extremum, le déplacement est nul. Quand la pression acoustique est positive (là où il y a condensation) les atomes se déplacent dans la direction de propagation de l'onde.

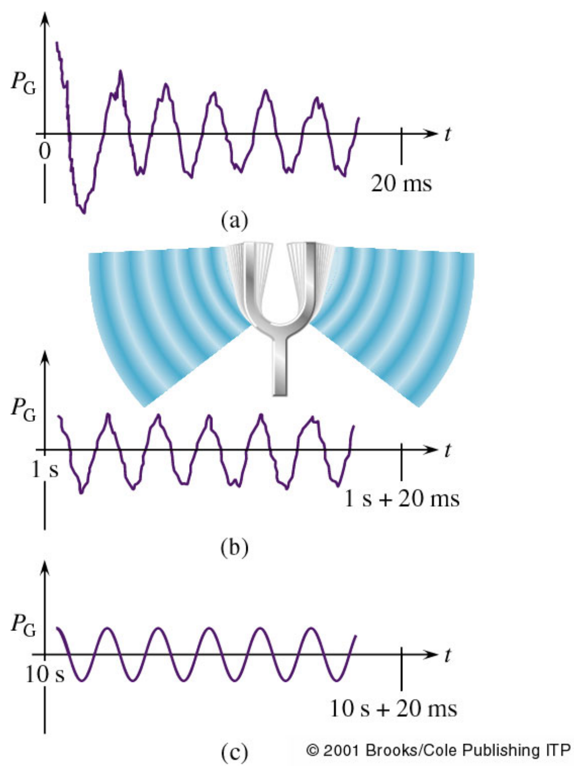

Figure 19.3: Pression acoustique engendrée par un diapason et observée à l'aide d'un oscilloscope: (a) immédiatement après avoir frappé le diapason; (b) après avoir oscillé pendant 1 s; (c) après avoir oscillé pendant 10 s. Lorsque le temps s'écoule, les vibrations du diapason de hautes fréquences sont amorties, laissant finalement une courbe régulière presque sinusoïdale.

La vitesse du son La vitesse du son dans un gaz parfait est égale à

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}$$

où P est la pression et ρ la masse volumique. La variable γ est caractéristique du moyen de transmission (comme nous verrons plus tard dans ce cours); pour les gaz diatomiques, $\gamma = 1.4$. Cette équation ne prévoit aucune variation de la vitesse du son avec sa fréquence. Ce fait est confirmé chaque fois vous écoutez de la musique dans une grande salle ou un stade; tous les sons arrivent ensemble, les hautes fréquences atteignent votre oreille en même temps que les basses fréquences.

Matériau	Vitesse (m/s)
Air (20^o)	343
Air (0^o)	331
Hélium	1005
Hydrogène	1300
Eau	1440
Fer et Acier	~ 5000
Verre	~ 4500
Aluminium	~ 5100

Tableau 19.1: Vitesse du son

19.2 Superposition des ondes

Une caractéristique importante de toutes les ondes est que deux ou plusieurs ondes qui se propagent dans la même région de l'espace se superposent pour produire des effets caractéristiques facilement observables. *Dans la région où deux ou plusieurs ondes du même type se superposent, l'onde résultante est la somme algébrique des contributions de ces ondes en chaque point.* C'est **le principe de superposition**, un des principes fondamentaux de la théorie des ondes. Les ondes continuent à se déplacer indépendamment l'une de l'autre. L'onde résultante n'est pas en général une onde sinusoïdale simple mais une onde composite.

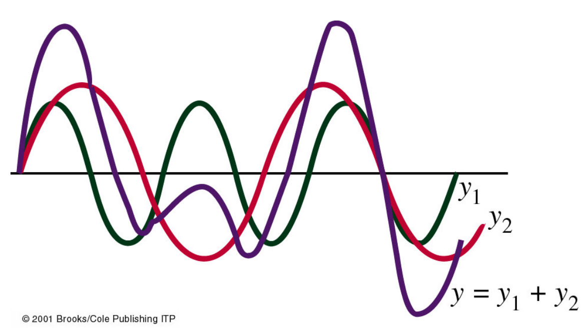

Figure 19.4: Superposition de deux ondes sinusoïdales de fréquences différentes. On voit que l'onde résultante $y = y_1 + y_2$ n'est pas sinusoïdale.

Analyse de Fourier Une utilisation très astucieuse du principe de superposition fut introduite par Jean-Baptiste Fourier (1786-1830) pour analyser des ondes non sinusoïdales.

Selon Fourier, toute fonction périodique de fréquence f (fonction dont la structure est reproductible à intervalles réguliers) peut être décomposée en une somme de sinus et cosinus avec des amplitudes et des phases appropriées:

$$y'(x,t) = a_1 \sin(\omega t + \phi_1) + a_2 \sin(2\omega t + \phi_2) + ... = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n\omega t + \phi_n)$$

avec $\omega = 2\pi f$. Le premier terme a la même fréquence f: c'est le **fondamental** ou le **premier harmonique** ($f_1 = f$). Le terme suivant, de fréquence $f_2 = 2f$ est appelé **deuxième harmonique**, et ainsi de suite. Notons que pendant le temps $1/f_1$ que met le fondamental pour décrire un cycle complet, le deuxième harmonique a décrit deux cycles et le n^{eme} harmonique n cycles. La fréquence de l'onde résultante est donc la fréquence f du fondamental (figure 19.5).

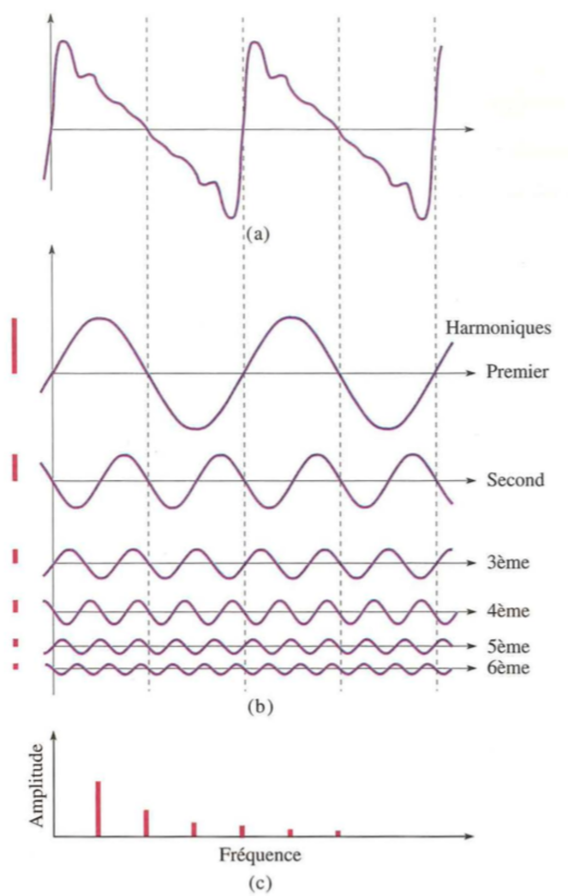

Figure 19.5: (a) Synthèse d'une onde en 'dents de scie'. (b) Ici, les six premiers harmoniques se combinent pour former une courbe qui ressemble clairement à la courbe en dents de scie. En ajoutant une douzaine d'autres termes on obtient une meilleure approximation. (c) Une représentation des amplitudes des différents harmoniques qui contribuent à l'analyse de Fourier. C'est ce qu'on appelle *spectre de fréquence.*

Interférence d'ondes Supposons qu'on envoie 2 sinusoïdes cohérentes (ondes qui sont synchrones, même ω) dans la même direction le long d'une corde tendue. Le résultat va dépendre du déphasage (décalage) des deux sinusoïdes.

$$y_1(x,t) = y_m \sin(kx - \omega t)$$
$$y_2(x,t) = y_m \sin(kx - \omega t + \phi)$$

Selon le principe de superposition:

$$y'(x,t) = y_m \sin(km - \omega t) + y_m \sin(km - \omega t + \phi) \Rightarrow$$

$$y'(x,t) = (2y_m \cos\frac{1}{2}\phi)\sin(kx - \omega t + \frac{1}{2}\phi)$$

car: $\sin\alpha + \cos\beta = 2\sin\frac{1}{2}(\alpha+\beta)\cos\frac{1}{2}(\alpha+\beta)$. L'onde résultante est aussi une sinusoïde voyageant dans la même direction, mais qui diffère des ondes originales par sa phase et son amplitude. Pour $\phi = 0^o$: l'interférence de deux ondes est **totalement constructive** et dans ce cas l'amplitude d'oscillation double. Pour $\phi = 180^o$: l'interférence de deux ondes est **totalement destructive** et la corde n'oscille pas.
NB: On réserve le terme interférence à la superposition d'ondes *cohérentes*, ondes qui sont synchrones (même ω) et dont le déphasage relatif ne varie pas avec le temps.

Battements Lorsque des ondes de fréquences voisines f_1 et f_2 se superposent, elle produisent des battement. Ceci est valable aussi bien pour les ondes sonores que pour les ondes lumineuses. L'intensité augmente et diminue à la fréquence $(f_1 - f_2)$, la *fréquence des battement*. Ce qu'on entend est la note de l'onde porteuse dont l'intensité passe par des maxima à la fréquence des battements. Un exemple illustratif est donné sur la figure 19.6.

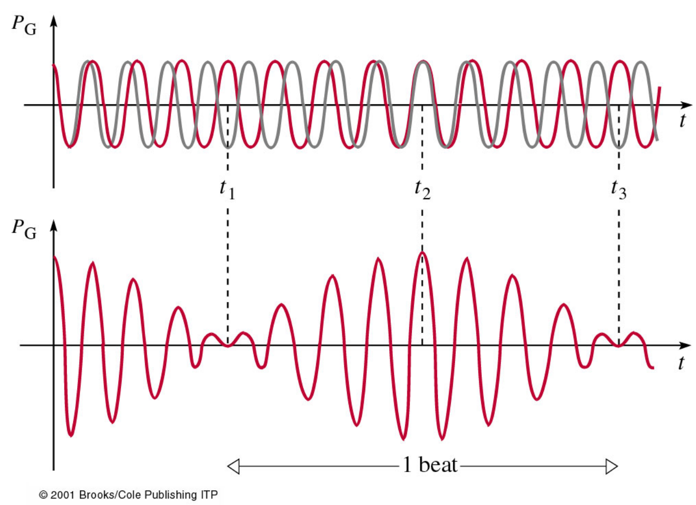

Figure 19.6: Le battement. Notons qu'en t_1 et t_3, les deux ondes sont en opposition de phase tandis qu'en t_2, elles sont en phase.

19.3 Les ondes stationnaires

Lorsqu'un train d'ondes de type quelconque est produit dans un milieu fini (une corde ou un tambour), il se propage jusqu'à ce qu'il rencontre la frontière du milieu où, en général, une certaine fraction de l'énergie de l'onde se réfléchit. Si la perturbation est entretenue, le milieu s'emplit rapidement des ondes qui se propagent dans un sens et dans l'autre.

Ces ébranlements se superposent (interfèrent) pour former une distribution stationnaire d'énergie appelée, un peu paradoxalement, *onde stationnaire*.

Ondes stationnaires sur une corde Prenons une corde de longueur L fixée à une extrémité. Si une onde sinusoïdale rencontre cette extrémité, il y aura une onde réfléchie qui sera l'image symétrique inversée de l'onde incidente; deux ondes sont donc présentes sur la corde et se propagent dans des directions opposées. Les ondes incidente et réfléchie se combinent pour produire une onde stationnaire caractérisée par des positions fixes ayant un déplacement nul, **les nœuds**, et des positions fixes ayant un déplacement maximal, **les ventres**.

Pour les deux ondes on peut écrire:

$$y_1(x,t) = y_m \sin(kx - \omega t)$$

$$y_2(x,t) = y_m \sin(kx + \omega t)$$

D'après le principe de superposition:

$$y'(x,t) = y_m \sin(kx - \omega t) + y_m \sin(kx + \omega t) = [2y_m \sin kx] \cos \omega t$$

Le terme entre crochets peut être interprété comme l'amplitude de l'oscillation d'un élément de corde à la position x. Cette fonction ne représente pas une onde progressive ($y = f(kx \pm \omega t)$) mais une onde stationnaire.

L'amplitude de cette onde sera strictement nulle pour certaines valeurs de k telles que $\sin kx = 0$ en tout temps t. Ces valeurs définisses des nœuds qui se trouvent à $kx = n\pi$, avec $n = 0, 1, 2, ...$, d'où $x = n\frac{\lambda}{2}$, où λ est la longueur d'onde. On aura les ventres aux positions où $|\sin kx|$ se maximise, soit $|\sin kx| = 1 \Rightarrow kx = \frac{\pi}{2} + n\pi$, d'où $x = (n + \frac{1}{2})\frac{\lambda}{2}$, avec $n = 0, 1, 2, ...$

Le tableau suivant fait le résumé des positions des nœuds et ventres pour les ondes stationnaires sur une corde.

	kx	$x = f(\lambda)$
Nœuds	$n\pi$	$n\frac{\lambda}{2}$
Ventres	$\frac{\pi}{2} + n\pi$	$(n + \frac{1}{2})\frac{\lambda}{2}$

Pour une corde fixée aux 2 extrémités, il doit y avoir au moins 2 nœuds, un à chaque extrémité. Ceci limite les fréquences d'une onde stationnaire le long d'une corde; seule les ondes dont L est un multiple entier de $\lambda/2$ peuvent exister. On a alors la condition $L = \frac{1}{2}N\lambda$ où N est un entier (figure 19.7). Les fréquences possibles correspondantes ($f = v/\lambda$) sont:

$$f_n = n\frac{v}{2L} = nf_1$$

La fréquence la plus basse f_1, correspond au **mode fondamental** ou première harmonique et la fréquence f_n à l'harmonique d'ordre n:

$$f_1 = \frac{v}{2L} = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{F_T}{\mu}}$$

La longueur d'onde λ est déterminé uniquement par la longueur de la corde. La fréquence f dépend aussi de la vitesse v, qui est donnée par la tension et la masse linéique.

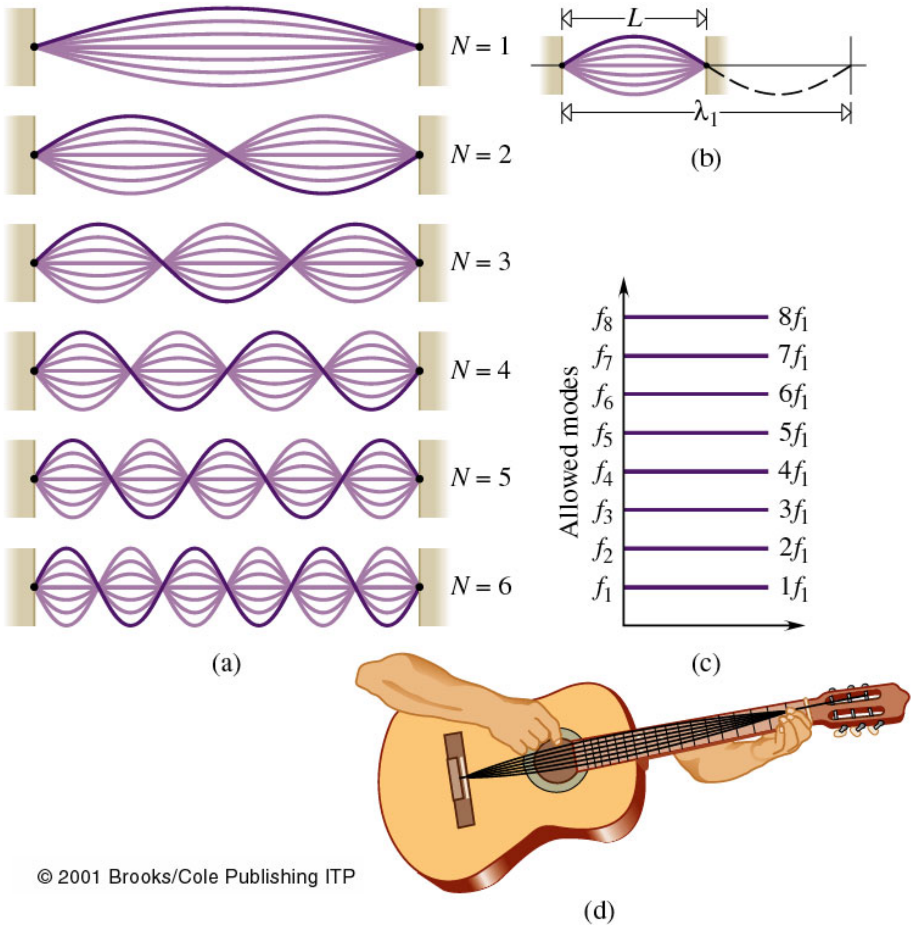

Figure 19.7: (a) Modes d'une onde stationnaire sur une corde avec un nœud à chaque extrémité. (b) La longueur d'onde du mode fondamental ($N = 1$) est $2L$. (c) Quelques premiers modes d'oscillation (harmoniques). (d) Une application importante des ondes stationnaires.

Application aux instruments de musique à cordes: Pour la guitare et le violon, toutes les cordes ont la même longueur, mais des masses linéiques différentes (on accorde en réglant la tension). Pour le piano et la harpe, les cordes ont en plus des longueurs différentes (note basse provient d'une corde longue et lourde). Galilée comprit qu'une corde vibrante "fait vibrer l'air qui l'entoure", produisant un son de même fréquence que la corde. Les cordes vibrantes ne peuvent pas ébranler une grande quantité d'air, car elles n'émettent pas elles-mêmes des sons de grande intensité. À cause de cela, elles sont toujours couplées à des caisses de résonance (comme dans les pianos, violons et guitares).

Ondes stationnaires dans un tuyau sonore Une colonne d'air peut être excitée de plusieurs façons pour se mettre à osciller: la plupart des bois sont excités par une anche vibrante, pour les cuivres ce sont les vibrations des lèvres du musiciens, l'orgue et la flûte reçoivent un jet d'air. La cavité d'air oscille initialement avec une large bande de fréquences, mais seules les fréquences stationnaires de la cavité subsistent et s'amplifient.

- **Pour un tuyau fermé aux deux extrémités:** les configurations d'ondes stationnaires sont les même que pour une corde aux extrémités fixes:

$$f_n = n\frac{v}{2L} \ (n = 1, 2, 3, ...)$$

où v est la vitesse du son dans l'air.

- **Pour un tuyau ouvert à une extrémité:** il peut être considéré comme la moitié d'un tuyau fermé aux deux extrémités:

$$f_n = n\frac{v}{4L} \ (n = 1, 3, 5, ...)$$

Ici on a seulement des harmoniques impairs. Les ondes sonores de compression subissent un déphasage de 180^o quand elles se réfléchissent sur une extrémité ouverte. Tous les instruments en cuivre sont fermés à une extrémité par la bouche de l'instrumentiste. Dans le cas d'une trompette, quand on presse les pistons, on ouvre une boucle supplémentaire; cela augmente la longueur du tuyau et la trompette joue plus bas.

- **Pour un tuyau ouvert aux 2 extrémités:** on a le même résultat que pour un tuyau fermé aux 2 extrémités à l'exception de l'emplacement des noeuds et ventres.

$$f_n = n\frac{v}{2L} \ (n = 1, 2, 3, ...)$$

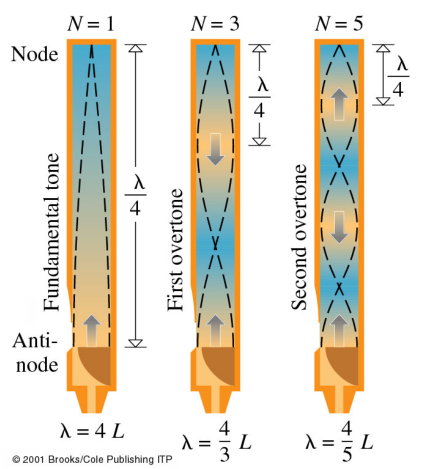

Figure 19.8: Quelques ondes stationnaires dans un tuyau d'orgue ouvert à son extrémité inférieure. Les flèches indiquent la direction de déplacement de l'air pendant la moitié d'un cycle. Les lignes tiretées indiquent les positions des nœuds et des ventres de déplacement. Tous les instruments en cuivre sont fermés à une extrémité par la bouche de l'instrumentiste.

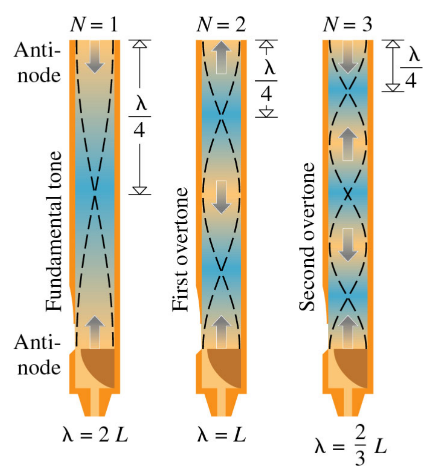

Figure 19.9: Les premières ondes stationnaires dans un tuyau sonore ouvert à ses deux extrémités. Les flèches indiquent la direction du mouvement de l'air pendant la moitié d'un cycle Ici, les deux extrémités du tuyau sont à la pression atmosphérique ($P_m = 0$); ce qui correspond à un nœud de pression.

Audition des sons - la musique
En musique, on définit les grandeurs suivantes:

- **Un intervalle:** le rapport des fréquences fondamentales de deux sons, ω/ω'. Si $\omega/\omega' = 2$ on a un octave.
- **Un accord:** un intervalle dont le rapport des fréquences est donné par deux petits nombres entiers. Par exemple: Quinte do-sol: $\omega/\omega' = 3/2$.
- **Le timbre:** Nous permet de distinguer les sons d'une flûte, un saxophone ou un violon. Il est donné par les composantes de Fourier.
- **Le volume sonore:** Dépend du spectre de fréquence, de la durée et surtout de l'intensité du son.

19.4 Niveau d'intensité

Intensité sonore
Une des caractéristiques importantes des ondes est l'énergie qu'elle transporte par unité de temps et par unité de surface. C'est ça qu'on appelle **l'intensité sonore**. Si une surface S placée perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde reçoit une puissance moyenne P_m, l'intensité (I) de l'onde est définie comme le rapport

$$I = \frac{P_m}{S}$$

L'intensité s'exprime en $\mathrm{W/m^2}$. Si une surface de 2 $\mathrm{m^2}$ reçoit une puissance de 1 W, lorsqu'elle est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde, l'intensité de l'onde est 0.5 $\mathrm{W/m^2}$.

Sensibilité de l'oreille humaine

L'oreille est un détecteur sonore incroyable:

- La plage de fréquence s'étend de 20 Hz à 20'000 Hz.
- L'intensité audible minimale est de 10^{-12} $\mathrm{W/m^2}$.
- L'intensité maximale admise (*seuil de douleur*) est en général 1 $\mathrm{W/m^2}$.

Notre perception sonore n'est pas directement proportionnelle à l'intensité. Pour que le volume sonore perçu double, il faut que l'intensité de l'onde sonore soit multipliée par 10. L'oreille est sensible au logarithme de l'intensité. C'est la loi de Fechner: *Un être humain perçoit le volume sonore d'une onde d'intensité* $10^{-2}\mathrm{W/m^2}$ *comme environ deux fois plus élevé que celui d'une onde sonore d'intensité* $10^{-3}\mathrm{W/m^2}$ *et comme environ 4 fois plus élevé que celui d'une onde sonore d'intensité* $10^{-4}\mathrm{W/m^2}$.

A cause de cette relation entre la sensation subjective du volume sonore et l'intensité qui est une quantité mesurable, on exprime d'ordinaire le niveau d'intensité sonore à l'aide d'une échelle logarithmique.

Le niveau d'intensité (ou niveau sonore, β) d'une onde acoustique se définit comme le nombre de multiplications par 10 nécessaires pour obtenir sa valeur à partir de seuil d'audibilité $I_o = 10^{-12}$ W/m^2.

$$\beta = 10 \log_{10} I/I_o$$

Il s'exprime en utilisant l'unité bel en hommage à Alexander Graham Bell qui mena d'importantes recherches en acoustique. Si $I = 10^n I_o$, le niveau sonore est de n bels. On exprime la performance d'un amplificateur acoustique, un récepteur, un haut-parleur etc. en une unité plus petite, le décibel (dB), le dixième du bel. Le seuil audible est $\beta = 10 \log_{10} 1 = 0$ dB. L'étendue totale de niveau sonore audible correspond à 120 dB ('concert de Rock'), valeur qui correspond à une intensité de $I = 1$ W/m^2.

Exemple 19.4.1. Considérons 10 violons identiques, jouant chacun à un niveau sonore de 70 dB. Quel sera le niveau sonore s'ils jouent ensemble?

Solution Donées: 10 sources à 70 dB chacune. À trouver: le niveau sonore de l'ensemble. L'intensité varie de I, à $2I$, à $3I$, ... jusqu'à $10I$. Pour calculer β pour deux violons nous avons:

$$10 \log_{10} \frac{2I}{I_o} = 10 \log_{10} 2 + 10 \log_{10} \frac{I}{I_o}$$

et le niveau sonore est 3 dB + 70 dB. Ainsi en doublant l'intensité, le niveau sonore augmente de 3 dB. Avec 3 instruments jouant, le niveau sonore s'élève à 75 dB; avec 4, il s'élève à 76 dB; et ainsi de suite jusqu'à 10 il atteint alors 80 dB. Dix violons produisent une intensité 10 fois celle d'un seul violon et donc 1 bel (10 dB) en plus et ceci correspond à doubler le volume sonore perçu.

19.5 Effet Doppler

Chaque sorte d'onde se propage dans un milieu homogène à une vitesse constante qui dépend seulement des propriétés physiques du milieu. Cela est vrai quelque soit le mouvement de la source: la source émet l'onde qui se propage. Cependant, la perception de la fréquence d'une onde et de sa longueur d'onde peut être modifiée considérablement par un mouvement relatif entre l'observateur et la source. Nous avons tous observé un changement dans la fréquence quand une ambulance s'approche puis s'éloigne. La hauteur du son est plus aigu lorsque l'ambulance s'approche et plus grave lorsqu'elle s'éloigne. Ce phénomène est appelé **effet Doppler**.

Nous envisagerons les 3 situations suivantes: Source en mouvement, observateur au repos; Source au repos, observateur en mouvement; et, Source et observateur en mouvement.

Source en mouvement, observateur au repos La situation la plus simple à analyser est celle d'une onde émise par une source qui se déplace vers un observateur immobile. Essentiellement le mouvement de la source réduit l'écart entre les fronts d'onde successifs avançant dans le sens de ce mouvement. Ainsi l'observateur trouve une longueur d'onde plus petite et une fréquence plus grande.

Supposons qu'à l'instant initial ($t = 0$), la source était au point 0. À l'instant t, elle s'est déplacée d'une distance $v_s t$. Dans un temps T, la première crête parcourt une distance $d = \lambda_s = vT$. Dans le même temps, la source parcourt une distance $d_s = v_sT$. La distance entre deux crêtes d'ondes successives, qui est la nouvelle longueur d'onde λ_o, en est réduite:

$$\lambda_o = d - d_s = \lambda_s - v_s\frac{\lambda_s}{v} = \lambda_s(1 - \frac{\lambda_s}{v}) \Rightarrow$$

$$\Delta\lambda = \lambda_o - \lambda_s = -v_s\lambda_s/v$$

La variation de la longueur d'onde est proportionnelle à la vitesse v_s de la source. La fréquence entendue par l'observateur vaut:

$$f_o = \frac{v}{\lambda_o} = \frac{v}{\lambda_s(1 - v_s/v)} = f_s\frac{v}{v - v_s}$$

Comme le dénominateur est plus petit que v, on a $f_o > f_s$. Si la source s'éloigne de l'observateur, on trouve:

$$f_o = f_s\frac{v}{v + v_s}$$

et $f_o > f_s$.

Source au repos, observateur en mouvement L'effet Doppler se produit aussi quand l'observateur bouge par rapport à une source au repos. Si l'observateur se rapproche de la source, le son est plus aigu. Si, au contraire, il s'en éloigne, le son devient plus grave. Quantitativement, la variation de fréquence est légèrement différente de celle correspondant à la source en mouvement. Dans ce cas, la distance entre les crêtes, la longueur d'onde λ_s, ne change pas, mais la vitesse de défilement des crêtes vue par l'observateur change. Si l'observateur se rapproche de la source, cette vitesse est $v' = v + v_o$ où v_o est la vitesse de l'observateur. La fréquence perçue par l'observateur est donc:

$$f_o = \frac{v'}{\lambda_s} = \frac{v + v_o}{\lambda_s} = f_s\frac{v + v_o}{v}$$

Si l'observateur s'éloigne de la source, la vitesse relative est: $v' = v - v_o$ et

$$f_o = f_s\frac{v - v_o}{v}$$

Effet Doppler - cas général On peut combiner les résultats précédents en une seule formule valable dans le cas où soit la source soit l'observateur est en mouvement, ou dans le cas où les deux bougent:

$$f_o = f_s\frac{v \pm v_o}{v \mp v_s} \tag{19.1}$$

où v_o est la vitesse de l'observateur et v_s est la vitesse de la source.

Les signes supérieurs s'appliquent si la source et l'observateur se rapprochent l'un de l'autre, les signes inférieurs s'ils s'éloignent. L'effet Doppler n'est perceptible que si v_o ou v_s n'est pas négligeable par rapport à v et si aucune de ces vitesses n'excède v.

Applications Lorsqu'un obstacle en mouvement réfléchit une onde sonore, la fréquence de l'onde réfléchie est, à cause de l'effet Doppler, différente de l'onde incidente. La combinaison de l'onde incidente et de l'onde réfléchie produit une interférence qui cause des battements. La fréquence des battements est égale à la différence des deux fréquences.

Il existe plusieurs applications de l'effet Doppler en médecine où on utilise généralement des ondes ultrasoniques dans un domaine de fréquences se situant dans le mégahertz; par exemple, les ondes réfléchies par les globules rouges permettent de déterminer la vitesse du sang.

Le même phénomène s'applique aux ondes électromagnétiques, et en particulier à la couleur (partie visible du spectre électromagnétique). On parle alors de "blue shift" et de "red shift" selon que la source lumineuse se rapproche ou s'éloigne, respectivement.

Exemple 19.5.1. Une voiture roule à 20.0 m/s en émettant un son de sirène de fréquence $f_s = 600$ Hz. Déterminez la fréquence perçue par un observateur immobile lorsque la voiture s'approche et quand elle s'éloigne. Prendre la vitesse du son égale à 340 m/s.

Solution Données: $v_s = \pm 20$ m/s, v=340 m/s et $f_s = 600$ Hz. À trouver: f_o. Nous utilisons l'équation 19.1. Nous poson $v_o = 0$ et nous calculons f_o lorsque la voiture s'approche ($v_s = -20.0$ m/s) et lorsqu'elle s'éloigne ($v_s = 20.0$ m/s). Ainsi, lorsque la voiture s'approche, l'observateur perçoit la fréquence:

$$f_o = \frac{v f_s}{v + v_s} = 638 \text{ Hz}$$

et lorsque la voiture s'éloigne:

$$f_o = \frac{v f_s}{v + v_s} = 567 \text{ Hz}$$

Exercices

Exercice 19.1. a) Etablir l'expression du décalage de Doppler dans le cas d'une onde émise par une source immobile, f_s, réfléchie sur une cible qui s'approche vers la source et interceptée par un observateur immobile. b) Application au cas suivant: une onde sonore de 1000 Hz est émise par une source immobile vers une cible qui s'approche. Si l'onde se réfléchie a une fréquence de 1200 Hz, quelle est la vitesse de la cible?

Exercice 19.2. Pierre, Marrie et Jean sont debout sur une ligne, avec Marie au centre et Pierre et Jean à une distance de 100 m chacun. Pierre et Jean chantent la même note au même temps, et Jean chante plus fort que Pierre. Marie court vers Jean, que-ce qui arrive au son perçu par Marie? A quelle vitesse les ondes sonores se propagent-elles?