

Chapitre2 : Notions d'acoustique physique

2.1 Introduction

Acoustique physique science est le domaine qui étudie les phénomènes sonores en étudiant à la fois les mécanismes de production, de propagation dans l'air et de réception de celui-ci.

2.2 Nature et propagation du son

Le son est une onde mécanique qui se transmet dans un milieu élastique depuis une source jusqu'à au récepteur (oreille ou un micro) engendrant une sensation auditive ou un signal sonore électrique. Les êtres humains, comme beaucoup d'animaux, ressentent cette onde grâce au sens de l'ouïe. (Voir **Figure 2.1**)



Figure 2.1 Propagation du Son

2.3 Source Sonore

2.3.1 Puissance(s) et Niveau de puissance acoustique d'une source

La source consomme une puissance électrique ou mécanique P . Elle communique à chaque instant au milieu de propagation une énergie vibratoire qui se propage de proche en proche dans le milieu. A cette énergie transmise correspond une puissance acoustique P_a . La source rayonne cette puissance acoustique avec un certain rendement acoustique η . La source est caractérisée par son niveau de puissance acoustique N_W .

P : Puissance consommée (Watt).

P_a : Puissance acoustique (Watt).

$$\eta = \frac{P_a}{P} \quad (2.1)$$

$$N_W = 10 \log \frac{P_a}{P} \quad (2.2)$$

$$P_a = P_0 * 10^{0.1*NW} \quad (2.3)$$

Avec $P_0 = 10^{-12}$ Watt puissance de référence

2.3.2 Caractéristiques d'une source

La source rayonne des ondes sphériques de rayon R. R représente la distance entre la source considérée comme ponctuelle et le récepteur.

- La source est omnidirectionnelle (ou isotrope) en général, elle émet alors sa puissance dans toutes les directions de l'espace de manière uniforme dans l'angle solide $\Omega = 4\pi$ stéradians.
- Certaines sources sont directives, elles rayonnent une quantité d'énergie variable avec la direction.

2.4 Qualité d'un son

2.4.1 Hauteur

Elle indique si un son est plus ou moins aigu. Elle dépend de la fréquence de la vibration. Une fréquence sonore faible va donner un **son grave**, une fréquence sonore élevée va donner un **son aigu**. Notre oreille ne perçoit que les **sons** compris entre 16 Hz (**son très grave**) et 20 kHz (**son très aigu**) (Voir Figure 2.2). La hauteur dépend surtout du fondamental et très peu des harmoniques.

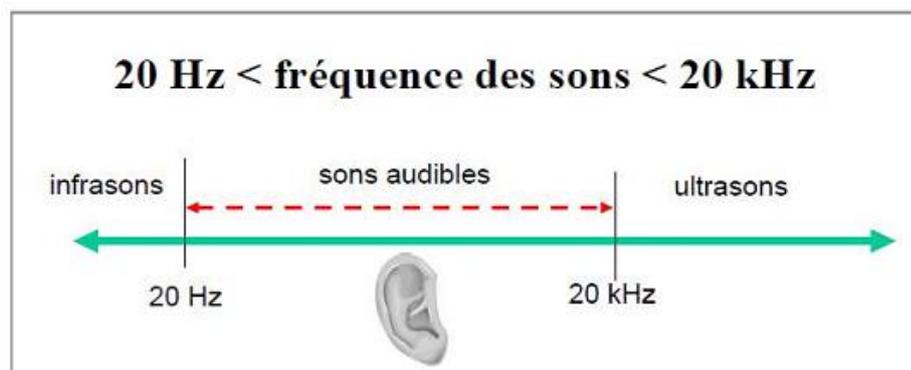


Figure 2.2 Acuité auditive de l'oreille humaine

2.4.2 Intensité

L'intensité indique si le son est plus ou moins fort. Elle relève de l'énergie dépensée lors de la vibration du tympan de l'oreille. Elle se traduit par l'amplitude plus ou moins grande des déformations du tympan. La valeur efficace de la pression P_{eff} exercée sur le tympan donne une mesure de l'intensité.

2.4.3 Intensité Acoustique, Puissance Acoustique, Pression Acoustique

I : intensité acoustique ($W \cdot m^{-2}$), du champ direct (elle représente la puissance par unité de surface à laquelle l'énergie acoustique est rayonnée (voir **Figure 2.3**).

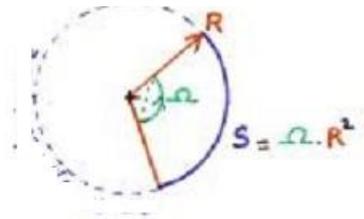


Figure 2.3 source sonore sphérique.

$$I = \frac{Pa}{S} = \frac{P_{eff}^2}{\rho * C} \quad (2.4)$$

$$S = \Omega * R^2 \quad (2.5)$$

$$S = 4\pi * R^2 \quad (2.6)$$

S : surface source (m^2)

Ω : angle solide d'émission source en (sr : steradian).

R : distance entre la source et le récepteur (m)

ρ : masse volumique de l'air ($kg \cdot m^{-3}$)

C : célérité ($m \cdot s^{-1}$)

P_{eff} : pression efficace de la pression acoustique.

Pa : puissance acoustique.

2.5 Caractéristiques De La Propagation Des Ondes Sonores Dans L'air

2.5 .1 Nature du phénomène physique qui se propage

Le phénomène qui se propage est une petite oscillation de matière autour de sa position initiale. Oscillation peut-être longitudinale si elle s'effectue dans la direction de propagation de l'onde ou transversale si elle s'effectue perpendiculairement à la direction de propagation.

2.5.2 Célérité des ondes sonores ou vitesse de propagation du son (milieu Air)

Les conditions de propagation d'une onde sonore sont telles que le milieu doit être élastique ce qui se traduit par des caractéristiques de masse, de raideur et d'amortissement. L'air est le milieu le plus immédiat pour faire le lien entre les sources sonores et les auditeurs.

On caractérise l'air par:

- sa masse volumique ρ (masse par unité de volume : $Kg \cdot m^{-3}$).
- sa température T (en Kelvin: K ; $0^\circ C = 273^\circ K$).
- sa pression atmosphérique p_0 (condition normale 10^5 Pascal).
- Impédance Acoustique (Z_a).

Par analogie avec l'électricité ou la mécanique, on définit l'impédance acoustique comme le rapport entre la pression et la vitesse acoustique.

$Z_a = \frac{p}{v}$. On définit pour l'air l'impédance caractéristique

$$Z_a = \rho_0 * C$$

La relation liant la masse volumique et la température est : $\rho = \frac{353}{T}$.

On définit pour ce milieu la célérité des ondes : $C = 20 * \sqrt{T}$.

Exemple :

Dans les conditions normales de températures à $20^\circ C$.

- 1) Calculer la masse volumique ρ de l'air.
- 2) Calculer la célérité C.
- 3) Calculer l'impédance caractéristique

Solution :

- 1) Calcule masse volumique ρ

D'après la relation ci-dessus $\rho = \frac{353}{T}$, avec T en degrés kelvin donc $T = 20 + 273 = 293^\circ K$

$$\rho = \frac{353}{293} = 1.2 \text{Kg.m}^{-3}.$$

2) Calcule de la célérité C

$$C = 20 * \sqrt{T} = 20 * \sqrt{293} = 342 \text{m.s}^{-1}$$

3) $Z_a = \rho_0 * C, Z_a = 1.2 * 342 = 410.4 \text{Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}.$

2.5.3 Expressions de la pression acoustique et de la vitesse acoustique

- **onde progressive**

Une onde progressive est la propagation d'une perturbation. Cette propagation se fait de proche en proche, avec transport d'énergie mais sans transport de matière (voir figure 2.4).

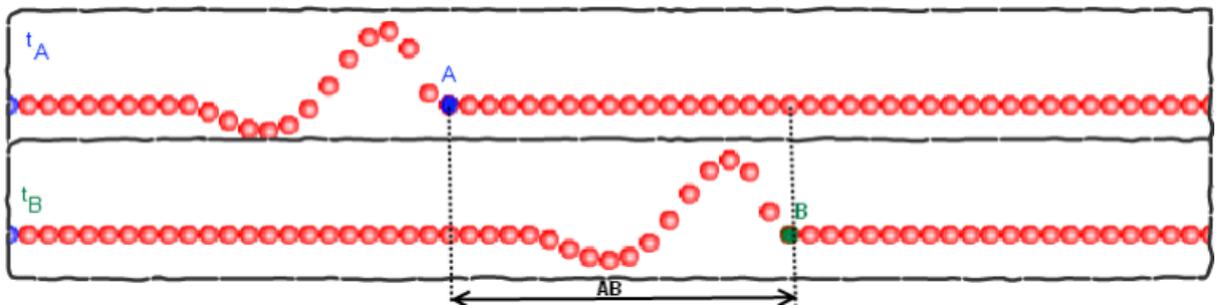


Figure 2.4 onde progressive

L'onde sonore qui se propage d'une source vers l'extérieur est appelée onde progressive aller. Soit S une source sonore émettant dans l'espace une onde sonore de fréquence f, (Voir Figure 2.5), l'expression de la pression acoustique au point M à une distance r de la source S est

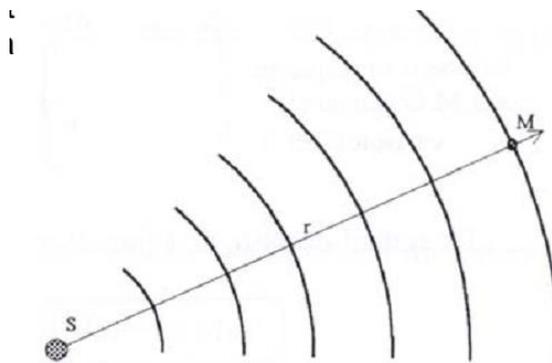


Figure 2.5 : onde progressive aller.

$$p_M(r, t) = P_M(r) \cdot \cos\left[2\pi f \left(t - \frac{r}{C}\right)\right] \quad (2.7)$$

Avec :

p_M = pression acoustique au point M dépendant des variables t et r.

P_M = amplitude de la pression. C : Célérité

Ici le déphasage φ est égal à : $\varphi = \frac{2\pi fr}{C}$.

On définit les caractéristiques suivantes :

La longueur d'onde: $\lambda = \frac{C}{f} = C * T$.

Le facteur d'onde : $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{C} = \frac{\omega}{C}$

Ce qui donne l'expression suivante de la pression acoustique au point M :

$$p_M(r, t) = P_M(r) \cdot \cos[(\omega t - k * r)] \quad (2.8)$$

En fait, la pression acoustique varie non seulement en fonction du temps mais aussi en fonction de la distance r. Un auditeur qui serait placé à une distance r_2 différente de r, recevrait au même instant t l'onde sonore déphasée de la quantité: $k(r_2 - r)$.

L'expression de la vitesse acoustique pour une onde progressive aller est :

$$v_M(r, t) = V_M(r) \cdot \cos[(\omega t - k * r)] \quad (2.9)$$

Avec :

v_M = vitesse acoustique au point M dépendant des variables t et r.

V_M = amplitude de la vitesse.

En tenant compte de l'impédance caractéristique de l'air :

$$v_M(r, t) = \rho_0 * C * P_M(r) \cdot \cos[(\omega t - k * r)] \quad (2.10)$$

2.5.4 Forme complexe des fonctions d'oscillations

Pour la simplification de certains calculs, il est intéressant de passer à la forme complexe des fonctions d'oscillation, en rajoutant une partie imaginaire à la partie réelle. Exemple pour la pression acoustique $p_M(r, t)$:

$$p_M(r, t) = P_M(r) \cdot \cos[(\omega t - k * r)] + jP_M(r) \cdot \sin[(\omega t - k * r)] \quad (2.11)$$

L'expression devient (en utilisant les relations d'Euler) :

$$p_M(r, t) = P_M(r) e^{j \cdot (\omega t - k * r)} \quad (2.12)$$

2.5.6 Exemples De Propagation Unidimensionnelle

- **Définitions**

On appelle propagation unidimensionnelle, une onde qui se propage dans une seule direction. La conséquence d'une telle propagation est qu'elle dépend uniquement d'une seule variable d'espace et que l'amplitude de cette onde reste constante dans l'hypothèse

On peut distinguer deux types de propagation unidimensionnelle :

1. La propagation longitudinale (l'oscillation des points matériels atteints par l'onde oscille est parallèle à la direction de propagation (voir **Figure 2.5**)
2. La propagation transversale (l'oscillation des points matériels atteints par l'onde oscillent orthogonalement à la direction de propagation (voir **Figure 2.6**)

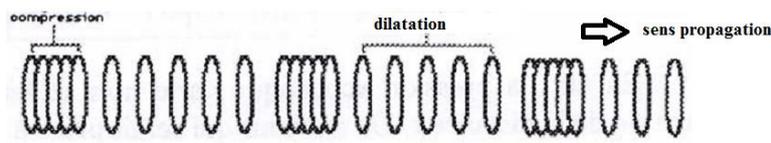


Figure 2.5 : onde longitudinale

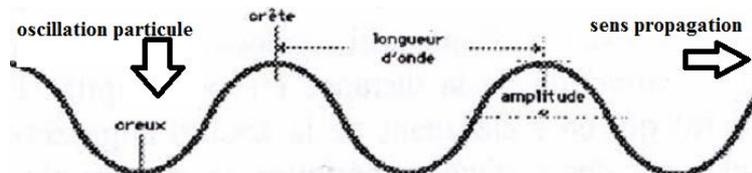


Figure 2.5 : onde Transversale

- **Equation de propagation**

Une telle onde est solution d'une équation différentielle du deuxième ordre appelée équation de propagation (ou équation des ondes) :

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = C^2 * \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (2.13)$$

C est la célérité de l'onde dans le milieu.

y représente l'élongation du point considéré à une position x donné et à un instant t donné.

La solution générale de l'équation de propagation en un point M quelconque du milieu de propagation est de la forme suivante :

$$y_M = A. \cos[(\omega t - k * x)] + B. \cos[(\omega t + k * x)] \quad (2.14)$$

Le terme $A. \cos[(\omega t - k * x)]$ est appelé **onde progressive aller**, elle s'éloigne du point source.

Le terme $B. \cos[(\omega t + k * x)]$ est appelé onde progressive retour, elle revient vers le point source.

2.5 .7 Relation Générale Entre La Pression Acoustique Et La Vitesse Acoustique.

L'expression de l'élongation des tranches d'air, solution de l'équation des ondes est :

$$s(x, t) = A. e^{j.(\omega t - k * x)} + B. e^{j.(\omega t + k * x)} \quad (2.15)$$

\downarrow
Onde aller

\downarrow
onde Retour

Par définition la vitesse acoustique est : $v(x, t) = \frac{\partial s(x, t)}{\partial t}$ (2.16)

D'où $v(x, t) = j\omega A. e^{j.(\omega t - k * x)} + B. e^{j.(\omega t + k * x)}$ (2.17)

L'imaginaire pur j, montre que la vitesse a un déphasage de $\pi/2$ par rapport à l'élongation.

L'expression de la pression acoustique :

$$p(x, t) = j\omega. \rho. C [A. e^{j.(\omega t - k * x)} - B. e^{j.(\omega t + k * x)}] \quad (2.18)$$

