

PROPAGATION DES ONDES SONORES
2^{ème} PARTIE

IV. Fonctionnement de l'oreille

- A. Description
- B. Caractéristiques de l'audition

V. Puissance Acoustique ; Intensité acoustique ; Niveau sonore

- A. Notion sur le rayonnement des sources
- B. Puissance Acoustique d'une source isotrope (W)
- C. Intensité Acoustique (I) et pression acoustique d'une source isotrope
- D. Intensité Acoustique (I) d'une source directive

VI. Niveau Sonore

- A. Niveau en puissance d'une source
- B. Niveau en intensité acoustique - Niveau en pression acoustique
- C. Les différentes définitions des niveaux (différentes unités de décibels)
- D. Addition des niveaux sonores
- E. Perception réelle du niveau sonore

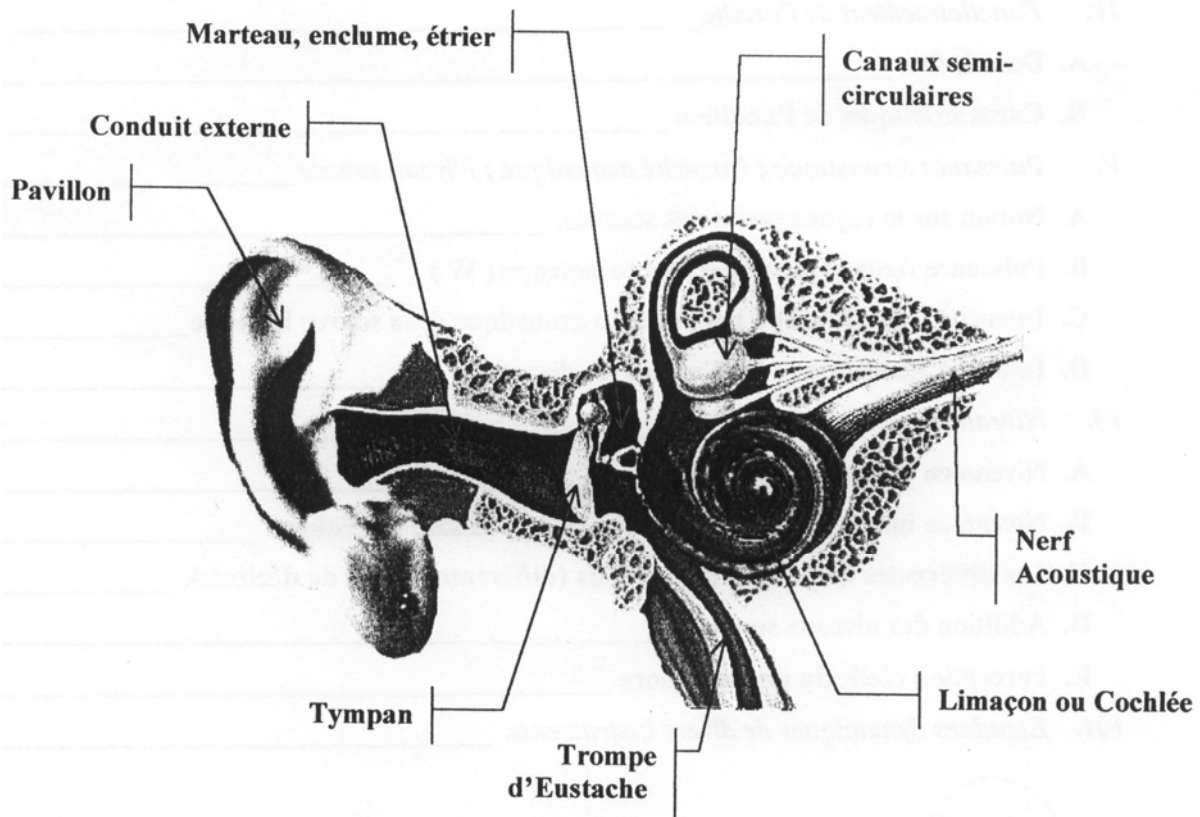
VII. Etendues dynamiques de divers instruments

Les principes liés à la propagation tridimensionnelle des ondes sonores dans le milieu air deviennent difficiles à manipuler, surtout si on doit tenir compte des phénomènes de réflexion, d'absorption ou de transmission. Dans cette deuxième partie, nous allons nous focaliser sur un des paramètres importants de l'onde sonore : **l'amplitude de la pression acoustique**.

Pour être plus proche des capacités de notre appareil auditif (l'oreille) nous allons introduire des mesures particulières de l'amplitude : **l'intensité, les niveaux sonores**.

IV. FONCTIONNEMENT DE L'OREILLE

A. Description



Oreille externe :

L'oreille externe est constituée du **pavillon**, cartilagineux, et du **conduit auditif externe**, d'environ 3 cm de long (voir exercice), qui pénètre dans le rocher. La paroi du conduit auditif est recouverte d'une substance visqueuse, le cérumen, provenant surtout de la sécrétion de glandes spécialisées.

Oreille moyenne :

L'oreille moyenne est formée essentiellement par la caisse du **tympan**, contenant le mécanisme de transmission des ondes sonores de l'oreille externe vers l'oreille interne, et par la **trompe d'Eustache**.

La caisse du tympan commence par la membrane tympanique, ou tympan, qui la sépare de l'oreille externe. A son autre extrémité, sa paroi osseuse est percée de deux petits orifices, la fenêtre ovale et la fenêtre ronde, qui séparent la caisse des liquides de l'oreille interne et qui sont fermés chacun par une membrane. A l'intérieur, la caisse du tympan est remplie d'air et comporte une chaîne de trois osselets, appelés marteau, enclume et étrier. Le **marteau** s'attache au tympan sur toute la longueur de son manche et s'articule par sa tête avec l'enclume, laquelle s'articule à son tour avec l'**étrier**. Ce dernier est triangulaire et sa base, s'appuie sur la fenêtre ovale.

La trompe d'Eustache est un fin conduit qui s'ouvre d'un côté dans la caisse du tympan, et de l'autre dans le rhino-pharynx (la partie du pharynx située en arrière des fosses nasales).

Oreille interne :

Située dans sa partie antérieure, la **cochlée** (ou limaçon, en raison de sa forme) renferme l'organe de l'audition (organe de Corti), connecté au cerveau par le nerf cochléaire. La partie postérieure du limaçon (ou appareil vestibulaire) contient les organes de l'équilibre, reliés au cerveau par le nerf vestibulaire. Cet appareil comprend en fait un renflement, le vestibule proprement dit, sur lequel s'ouvrent trois **canaux semi-circulaires**, en forme de demi-cercles et approximativement disposés à angle droit les uns par rapport aux autres. Les deux nerfs, cochléaire et vestibulaire, se réunissent dans le conduit auditif interne pour former le **nerf auditif**.

B. Caractéristiques de l'audition

L'oreille est capable d'entendre des sons dont la fréquence varie de 16 Hz à 20 000 Hz (pour une bonne oreille, nous ne sommes malheureusement pas égaux devant ces phénomènes de perception).

Nous sommes de plus capable de percevoir des sons dont l'amplitude varie de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa (seuil d'audibilité) à 20 Pa (seuil de la douleur). Mais notre perception des niveaux sonores diffèrent avec la fréquence (voir **courbes de Fletcher ou d'isotonie : VI-E**). Notre sensibilité est peu importante, et il faut de grandes variations d'amplitude pour que nous percevions une variation du niveau sonore. L'outil mathématique qui est le proche du modèle de perception de l'oreille est le **Logarithme décimal**.

V. PUISSANCE ACOUSTIQUE ; INTENSITE ACOUSTIQUE ; NIVEAU SONORE

A. Notion sur le rayonnement des sources.

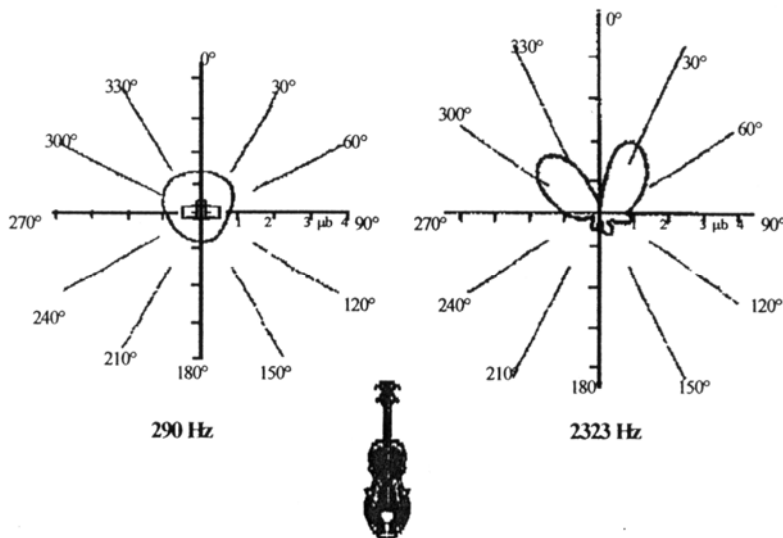
Le placement d'un auditeur par rapport à la source fait varier d'une façon significative l'écoute (Exemple : placez vous devant ou derrière un guitariste; on n'entend pas les mêmes sonorités Si on analyse quantitativement le rayonnement on s'aperçoit qu'il y a diminution surtout dans les hautes fréquences). La nature géométrique, les caractéristiques d'interactions mécano-acoustiques de la source sonore influent sur la propagation du champ acoustique qui se révèle non uniforme.

- L'étude de ce phénomène débouche sur les caractéristiques de directivité de la source.
- L'étude de ce champ à une distance donnée de la source est le rayonnement.

Un principe de rayonnement est à retenir pour le domaine audible_:

Les hautes fréquences sont plus directives que les basses fréquences.

Exemple de rayonnement : (μb = micro bars ; $1 \mu\text{b} = 0,1 \text{ Pa}$)



Rayonnement d'un violon à deux fréquences différentes.

Dans l'exemple ci-dessus, on remarque que, si on positionne le micro à la verticale du violon (0°), il ne captera pas les fréquences proches de 2000 Hz (2323 Hz dans l'exemple) car elles sont plus directives. Une bonne position du micro serait de 30°.

Le choix des emplacements microphoniques s'avère important et doit donc être pensé pour chaque instrument ou groupe d'instrument.

De part sa nature, le microphone apparaît comme un point devant l'aspect tridimensionnel du rayonnement. Il n'est donc pas possible de récupérer l'ensemble du champ rayonné (sauf dans quelques cas, encore limités à la recherche). Dès lors, une prise de son ne consiste pas à respecter le rayonnement de l'instrument mais plutôt à respecter le message, à le rendre intelligible pour l'auditeur (nature de l'instrument, jeu instrumental et musical...) tout en respectant l'équilibre sonore dans le jeu musical.

B. Puissance Acoustique d'une source isotrope (W)

La puissance acoustique est la somme des produits des amplitudes de la pression acoustique et de la vitesse acoustique en tout point d'un front d'onde.

Si la pression et la vitesse acoustique sont uniformes sur le front d'onde, on a :

$$W = p_e \cdot v_e \cdot S$$

S : surface du front d'onde.

p_e et v_e : valeurs efficaces de la pression et de la vitesse acoustique.

(avec $W = \frac{P_M^2}{2\rho \cdot c} \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2$ pour une source isotrope)

$$2\rho \cdot c$$

S'il n'y a pas de dissipation (air parfait : pas de pertes visco-thermiques) :

W = cste

pour tout le front d'onde.

Si le rayonnement s'effectue dans tout l'espace, le front d'onde est sphérique. La surface d'une sphère est $S = 4 \cdot \pi \cdot r^2$ (r : rayon de la sphère).

C.. Intensité Acoustique (I) et pression acoustique d'une source isotrope

Si le son est rayonné de manière isotrope, la puissance acoustique W de la source se répartit dans l'espace, à travers des surfaces sphériques dont la source est le centre.

Les aires de ces surfaces croissent à mesure que la distance à la source augmente.

L'intensité acoustique à une distance r de la source est :

$$I = \frac{W}{S} = \frac{W}{4\pi r^2}$$

L'intensité est exprimée en $W \cdot m^{-2}$

$$I = \frac{P_M^2}{2\rho \cdot c} \text{ (source isotrope)}$$

Elle décroît comme $\frac{1}{r^2}$.

Dans le cas des ondes progressives incidentes, la relation entre les amplitudes de vitesse et de pression est :

$$p = \rho \cdot C \cdot v$$

La relation entre les valeurs efficaces est identique :

$$p_e = \rho \cdot C \cdot v_e$$

(avec $p_e = \frac{p}{\sqrt{2}}$ et $v_e = \frac{v}{\sqrt{2}}$)

Et donc, à partir de l'expression **W = $p_e \cdot v_e \cdot S$**

On obtient : **W = $\frac{p_e^2}{\rho \cdot C} \cdot S$**

soit **$p_e = \frac{1}{r} \cdot \sqrt{[W \cdot \rho \cdot C]}$**

La pression acoustique p décroît comme $\frac{1}{r}$ (l'intensité acoustique décroît beaucoup plus vite que la pression acoustique).

La relation entre l'intensité acoustique et la pression acoustique est : $I = \frac{p_e^2}{\rho_0 \cdot C}$

D. Intensité Acoustique (I) d'une source directive

On caractérise la directivité de la source par son **facteur de directivité Q**. L'intensité sonore directe à une distance r de la source est dans ce cas :

$$I_D = \frac{W \cdot Q}{4\pi r^2}$$

Pour une source isotrope $Q = 1$.

Il est possible de rendre directive une source isotrope, en supprimant artificiellement une partie de l'espace (dans ce cas on parle de facteur d'encastrement).

Si on place une source isotrope au milieu d'un mur, $Q = 2$.

Si on place une source isotrope au milieu d'un dièdre (à l'intersection de deux murs), $Q = 4$.

Si on place une source isotrope au fond d'un trièdre, $Q = 8$.

VI. NIVEAU SONORE

L'oreille est capable de percevoir des sons d'intensité variant de 10^{-12} à quelques Watt.m^{-2} . Malgré cette capacité tout à fait remarquable, l'oreille est peu précise en ce qui concerne les variations d'intensité, ce qui nous oblige à passer dans une échelle plus proche des performances auditives : **le décibel (dB)**.

L'oreille est peu sensible à une variation de ± 3 dB.

Le niveau sonore s'exprime en décibels.

A. Niveau en puissance d'une source :

Par définition :

$$L_w = 10 \cdot \text{Log} \left[\frac{W}{10^{-12}} \right] \quad (10^{-12} = \text{puissance acoustique de référence})$$

Le seuil d'audibilité est indiqué pour 0 dB

B. Niveau en intensité acoustique - Niveau en Pression acoustique

Par définition le niveau en intensité est :

$$L_I = 10 \cdot \text{Log} \left[\frac{I}{10^{-12}} \right] \quad (10^{-12} = \text{intensité acoustique de référence})$$

Le niveau en pression s'écrit :

$$L_p = 20 \cdot \text{Log} \left[\frac{p_e}{2 \cdot 10^{-5}} \right] \quad (2 \cdot 10^{-5} = \text{pression acoustique de référence} = \text{seuil d'audibilité})$$

($L_I = L_p$ en champ libre pour $\rho \cdot C = 400$ S.I)

Nous avons vu que l'intensité est proportionnelle à $\frac{1}{r^2}$, tandis que la pression acoustique p décroît comme $\frac{1}{r}$.

Cela signifie que l'intensité est réduite au quart de sa valeur initiale si la distance double, l'atténuation qui en résulte est de 6 décibels.

Par exemple, si une source produit un niveau d'intensité sonore de 100 dB à 2m, le niveau d'intensité sonore sera de 94 dB à 4 m, 88 dB à 8 m, 82 dB à 16 m, etc...

Cette loi de décroissance n'est vraie qu'à partir d'une distance r grande par rapport aux dimensions de la source et vis-à-vis de la longueur d'onde maximale du son émis.

Toutes les autres caractéristiques acoustiques (force, vitesse, débit) sont proportionnelles à la pression (p). Par exemple, on peut définir un niveau en vitesse, en tension.

De même en électricité, on montre, lors de l'étude des haut-parleurs ou des micros, que les caractéristiques électriques (tension, intensité) sont proportionnelles aux caractéristiques de pression acoustique.

Exemple : un microphone est caractérisé par sa sensibilité = $\frac{\text{Tension de sortie}}{\text{pression reçue}} = \frac{U}{p}$

Un niveau de tension s'exprimera par : $L = 20 \cdot \text{Log} \left[\frac{U}{U_{\text{ref}}} \right]$

La référence U_{ref} dépend de la capacité du système qui traite le signal électrique (en général U_{ref} correspond à un niveau maximum).

C. Les différentes définitions des niveaux (différentes unités de décibels).

• **dB SPL ou dB Acoustique** : ce niveau sonore est défini par rapport à la **référence minimale d'audition**.
 L_w , L_I , L_p sont en général en dB SPL.

• **dB_A, dB_B, dB_C**: ces trois niveaux sonores sont définis par rapport à des mesures psychoacoustiques de l'audition (voir E. *Perception réelle du niveau sonore*).

D. Addition des niveaux sonores.

Lors d'une propagation tridimensionnelle, le principe de superposition s'applique aux intensités acoustiques ou au carré des pressions.

Soient deux sources d'intensité respectives I_1 et I_2 , l'intensité résultante est $I_1 + I_2$, et le niveau sonore résultant est :

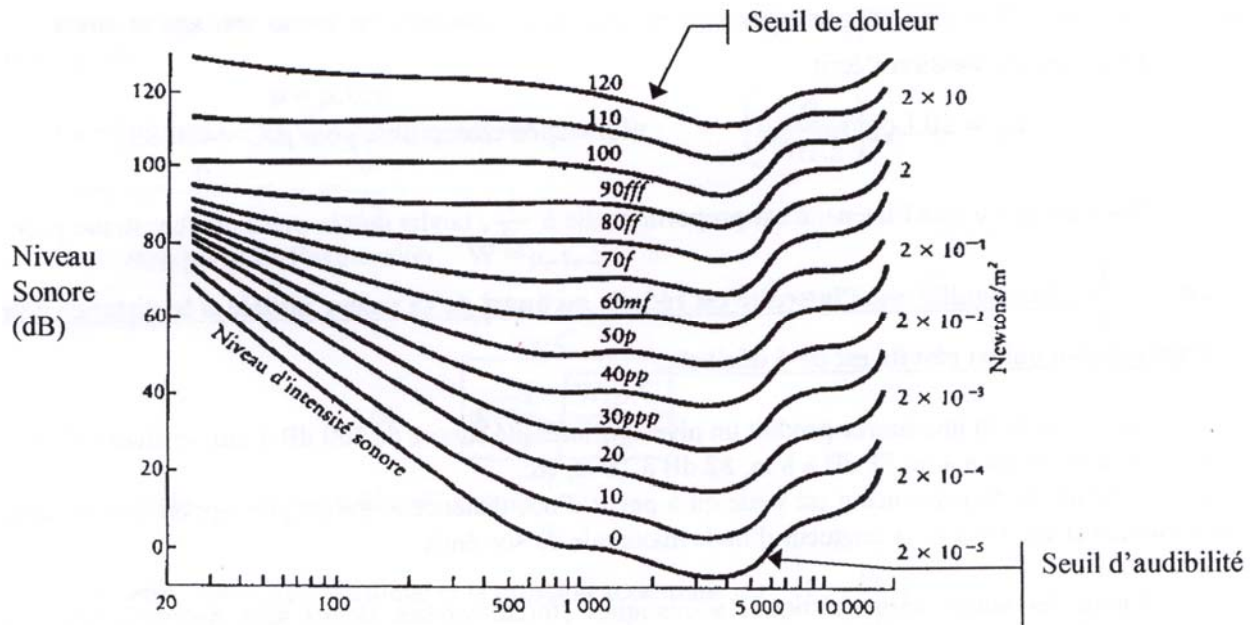
$$L_I = 10 \cdot \text{Log} \left[\frac{I_1 + I_2}{10^{-12}} \right]$$

Pour les pressions acoustiques on écrit : $p_{\text{total}}^2 = p_1^2 + p_2^2$

ATTENTION: Les niveaux sonores ne s'additionnent pas !

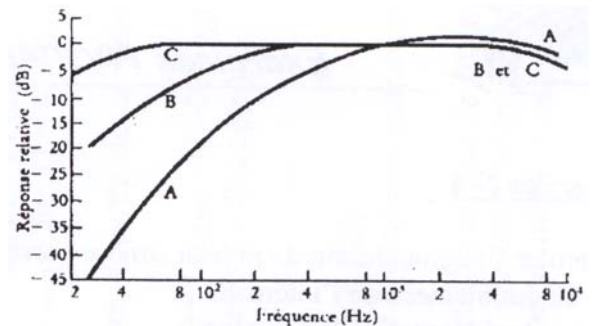
E. Perception réelle du niveau sonore

Pour chaque fréquence, on ne perçoit pas la même intensité sonore (intensité apparente - voir courbes de Fletcher ci-dessous).



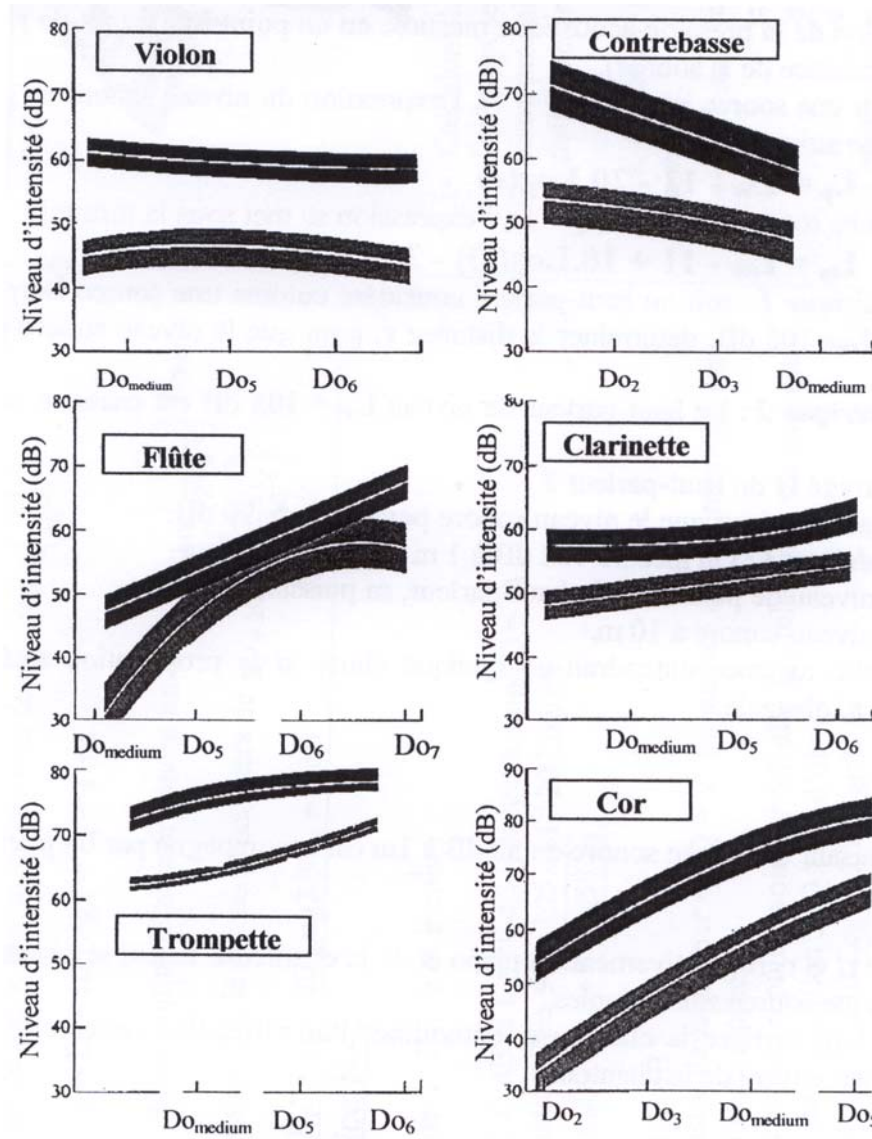
D'après l'étude des courbes d'isonie (courbe d'égale d'intensité sonore apparente), on définit trois types de courbes de pondération A, B et C tenant compte de ses caractéristiques de perception. Les décibelmètres (ou sonomètres) tiennent compte de ses pondérations pour délivrer les niveaux sonores. Selon la puissance sonore on choisira l'une ou l'autre des courbes de pondération.

- Courbe A Niveau assez Faible
- Courbe B Niveau Moyen
- Courbe C Niveau Fort.



On remarque une particularité intéressante de l'oreille à l'étude des courbes de Fletcher. La zone fréquentielle la plus sensible à nos oreilles est située entre 1000 et 5000 Hz (ce qui s'explique par l'étude du conduit auditif qui se comporte comme un tube acoustique ayant des résonances particulières).

VII, ETENDUES DYNAMIQUES DE DIVERS INSTRUMENTS.



Exercices PROPAGATION DU SON dans l'espace

Exercice 1

Calculer l'augmentation de niveau sonore correspondant

- 1- au doublement de l'intensité.
- 2- au doublement de la pression.

Exercice 2

L'expression du niveau sonore en pression est : $L_p = 20 \cdot \text{Log} \left[\frac{p_e}{2 \cdot 10^{-5}} \right]$

L'expression du niveau en puissance de la source est : $L_w = 10 \cdot \text{Log} \left[\frac{W}{10^{-12}} \right]$

1- Trouver l'expression de la pression acoustique mesurée en un point M, distant de r de la source, en fonction de W (puissance de la source).

2- Montrer que, pour une source isotrope ($Q = 1$), l'expression du niveau sonore en pression peut se mettre sous la forme suivante :

$$L_p = L_w - 11 - 20 \cdot \text{Log}(r)$$

3 - Montrer que pour une source directive ($Q > 1$), l'expression se met sous la forme

$$L_p = L_w - 11 + 10 \cdot \text{Log}(Q) - 20 \cdot \text{Log}(r)$$

4- Application numérique 1 : soit un haut-parleur considéré comme une source isotrope ayant un niveau de puissance $L_w = 105$ dB, déterminer la distance r, pour que le niveau sonore perçu soit de 90 dB.

5- Application numérique 2 : Le haut-parleur de niveau $L_w = 105$ dB est encastré au centre d'un mur.

- a) Quelle est la directivité Q du haut-parleur ?
- b) Déterminer la distance r, pour que le niveau sonore perçu soit de 90 dB.

6- Application numérique 3 : On mesure 102 dB à 1 m d'un haut-parleur.

- a) Calculer le niveau de puissance du haut-parleur, sa puissance W.
- b) Calculer le niveau sonore à 10 m.
- c) Jusqu'à quelle distance entendrait-on quelque chose si la propagation s'effectuait sans atténuation, ni obstacle.

Exercice 3

Une chanteuse produisant un niveau sonore de 50 dB à 1 m est accompagné par un piano qui produit 70 dB à 1 m.

- 1 - A quelle distance r_1 et r_2 respectivement du piano et de la chanteuse faut-il se placer pour que les intensités dues à chaque source soient égales.
- 2 - Le piano est à 2 m derrière la chanteuse, déterminer l'amplification nécessaire pour que les intensités soient égales à 10 m de la chanteuse.

Corrections

Exercice 1

1- Pour une intensité I , le niveau sonore est : $L_I = 10 \cdot \text{Log} \left[\frac{I}{10^{-12}} \right]$.

Pour une intensité $2.I$, le niveau sonore sera de $L_I' = 10 \cdot \text{Log} \left[\frac{2.I}{10^{-12}} \right]$.

D'où : $L_I' = L_I + 10 \cdot \text{Log} 2 = L_I + 3 \text{ dB}$

2- Pour une pression p , le niveau sonore est : $L_p = 20 \cdot \text{Log} \left[\frac{p_e}{2 \cdot 10^{-5}} \right]$

Pour une pression $2.p$, le niveau sonore sera de $L_p' = 20 \cdot \text{Log} \left[\frac{2.p_e}{2 \cdot 10^{-5}} \right]$

D'où : $L_p' = L_p + 20 \cdot \text{Log} 2 = L_I + 6 \text{ dB}$

Exercice 2

1, 2 et 3- voir cours

4- $L_w = 105 \text{ dB}$ et $L_p = 90 \text{ dB}$ (source isotrope $Q = 1$)
de l'équation 2 :

$$90 = 105 - 11 - 20 \cdot \text{Log}(r)$$
$$\Leftrightarrow 20 \cdot \text{Log}(r) = 4 \Leftrightarrow \boxed{r = 2,24 \text{ m}}$$

5- $L_w = 105 \text{ dB}$

a) encastré dans un mur $\Rightarrow Q = 2$ (la surface de rayonnement est réduite de moitié).

b) On cherche r pour avoir : $L_p = 90 \text{ dB}$. La relation à utiliser est celle de la question 3 ($Q > 1$), d'où :

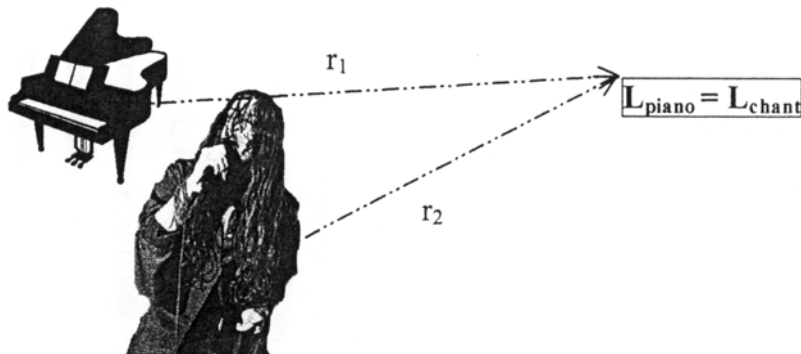
$$90 = 105 - 11 + 10 \cdot \text{Log} 2 - 20 \cdot \text{Log}(r)$$
$$\Leftrightarrow 20 \cdot \text{Log}(r) = 7 \Leftrightarrow \boxed{r = 2,24 \text{ m}}$$

6- a) on cherche L_w : $102 = L_w - 11 - 20 \cdot \text{Log}(1) \Leftrightarrow \boxed{L_w = 113 \text{ dB}}$

b) A 10 m : $L_p = 113 - 11 - 20 \cdot \text{Log}(10) = \boxed{82 \text{ dB}}$

c) $L_p = 0 = 113 - 11 - 20 \cdot \text{Log}(r) \Leftrightarrow 20 \cdot \text{Log}(r) = 102 \Leftrightarrow \boxed{r = 126 \text{ km}}$ (résultat absurde car sur cette distance, les phénomènes d'amortissement dans l'air ne sont plus négligeables).

Exercice 3



1- Calculons les niveaux en puissances du piano et de la chanteuse (on supposera que chaque source est isotrope) :

$$\text{le piano produit } 70 \text{ dB à } 1 \text{ m} \quad \Leftrightarrow \quad L_{w(\text{piano})} = 70 + 11 = 81 \text{ dB}$$

$$\text{la chanteuse produit } 50 \text{ dB à } 1 \text{ m} \quad \Leftrightarrow \quad L_{w(\text{chant})} = 50 + 11 = 61 \text{ dB}$$

Les distances r_1 et r_2 sont déterminées à partir de la relation suivante :

$$L_{\text{piano}} = L_{\text{chant}} \quad \Leftrightarrow \quad L_{w(\text{piano})} - 11 - 20 \cdot \text{Log}(r_1) = L_{w(\text{chant})} - 11 - 20 \cdot \text{Log}(r_2)$$

$$\Leftrightarrow L_{w(\text{piano})} - L_{w(\text{chant})} = 20 \cdot \text{Log}(r_1) - 20 \cdot \text{Log}(r_2)$$

$$\Leftrightarrow 20 = 20 \cdot \text{Log}(r_1/r_2)$$

$$\Leftrightarrow \text{Log}(r_1/r_2) = 1$$

La relation entre les distances est donc : $r_1 = 10 \cdot r_2$

Il faut placer le piano 10 fois plus loin que la chanteuse pour avoir la même sensation sonore.

2- Le piano est à 2 m de la chanteuse, il est donc atténué de $20 \text{Log}2$ par rapport à la chanteuse. Soit 6dB. La chanteuse devra avoir un gain de $(70-6)-50 = 14 \text{ dB}$, pour arriver au même niveau que le piano. Réellement il faut prendre plus.