

# Chapitre 2

## Caractéristiques énergétiques du son

### INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on ne s'intéresse pas aux fluctuations temporelles des différentes grandeurs mais au contraire à leur moyenne temporelle (puissance émise par une source, intensité sonore, ...).

En particulier, l'expression « pression du milieu de propagation » désignera dorénavant la valeur efficace  $p_e$  de la pression acoustique telle qu'elle a été définie au chapitre précédent :  $p_e^2 = \langle p^2(t) \rangle$ .

L'espace de propagation, dans ce chapitre, n'offre aucun obstacle à la propagation d'un son ; on dit qu'on se trouve en *champ libre*. Cet espace est, de plus, supposé homogène et isotrope (ses propriétés sont indépendantes de la direction de propagation).

La source sonore considérée, dans ce chapitre, est toujours ponctuelle ; ses dimensions étant nettement inférieures aux longueurs d'onde émises.

### PRESSION ACOUSTIQUE ET INTENSITE SONORE

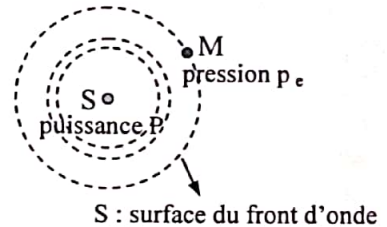
#### ► Puissance sonore moyenne

On montre que la puissance sonore moyenne  $P$  transportée par l'onde, à la célérité  $c$ , dans un milieu de propagation dont la masse volumique est  $\rho$  s'écrit :

$$P = \frac{p_e^2 S}{\rho c} \quad P \text{ en W, } p_e \text{ en Pa, } \rho \text{ en kg.m}^{-3}, c \text{ en m.s}^{-1}, S \text{ en m}^2$$

$S$  désigne la surface d'un front d'onde passant par un point  $M$  ;  $p_e$  désigne, dans ce cas, la pression au point  $M$ .

$P$  est appelée également puissance acoustique émise par la source sonore ;  $c$ 'est une caractéristique de cette source.



*Rappel* : La grandeur  $\rho c$  est appelée *impédance acoustique du milieu* de propagation :

$$Z_c = \rho c \quad Z_c \text{ en kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

#### ► Intensité sonore

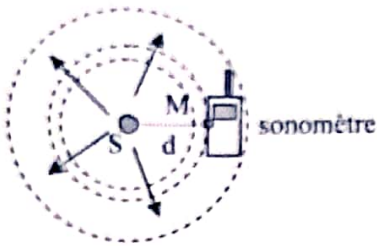
On introduit également l'intensité sonore (ou intensité acoustique)  $I$  égale au flux de la puissance moyenne transportée par l'onde ; c'est la puissance moyenne transportée par l'onde par unité de surface, la surface d'onde étant prise perpendiculairement à la direction de propagation.

L'intensité acoustique de l'onde sonore s'écrit alors :

$$I = \frac{P}{S} = \frac{p_e^2}{\rho c} \quad I \text{ s'exprime en W.m}^{-2}$$

La surface  $S$  sur laquelle l'énergie sonore se répartit augmente quand on s'éloigne de la source de sorte qu'il y a toujours affaiblissement de l'intensité sonore (la puissance  $P$  restant identique puisqu'elle caractérise la source).

- Pour une source ponctuelle omnidirectionnelle, la surface d'onde est une sphère de rayon  $d$  ( $d$  : distance entre la source et le point de mesure  $M$ ).



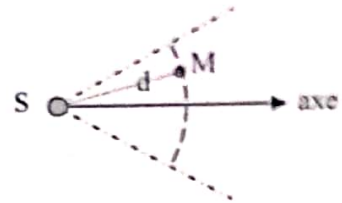
$$I = \frac{P}{4\pi d^2} = \frac{p_e^2}{\rho c}$$

- Pour une source ponctuelle directive, la puissance sonore  $P$  n'est pas uniformément distribuée autour de la source sonore.

On définit, pour chaque direction, un coefficient de directivité  $Q$  :  $Q = \frac{I_M}{I}$

$I_M$  : intensité sonore en  $M$  (direction  $SM$  avec  $SM = d$ )

$I$  : intensité sonore qu'on obtiendrait, à la même distance  $d$ , avec une source omnidirectionnelle de même puissance acoustique  $P$ .



On a donc :  $I_M = \frac{QP}{4\pi d^2}$

## LA RECEPTION

Il est utile d'introduire une échelle logarithmique afin de réduire l'étendue entre les valeurs extrêmes des pressions, des intensités sonores,....

Le décibel est une grandeur sans dimension.

### ► Niveau de pression

La pression la plus faible à laquelle l'oreille humaine soit sensible (à 1000 Hz) est choisie, usuellement, comme référence des pressions (\*).

Le niveau de pression est noté  $L_p$  (L pour Levél) ou  $N_p$  (N pour Niveau).

$$L_p = 10 \log \frac{p_e^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p_e}{p_0}$$

$p_e$  : pression acoustique correspondant au son étudié (Pa) (valeur efficace)

(\*)  $p_0$  : pression acoustique de référence égale à  $2 \times 10^{-5}$  Pa

$L_p$  : Niveau de pression acoustique du son étudié en décibel (en dB<sub>spl</sub> ou, plus simplement, dB) ; spl pour

« Sound pressure Level » rappelle que la pression de référence choisie est  $2 \times 10^{-5}$  Pa.

### ► Niveau d'intensité sonore

Le niveau d'intensité sonore est noté  $L_I$  (L pour Levél) ou  $N_I$  (N pour Niveau) :  $L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}$

$I$  : intensité sonore du son étudié ( $W \cdot m^{-2}$ )

$I_0$  : intensité sonore de référence égale à  $10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$

$L_1$  : niveau d'intensité sonore du son étudié (en dB).

L'intensité sonore de référence est égale à  $10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$  ; c'est à peu près l'intensité sonore à laquelle l'oreille humaine est sensible (à 1000 Hz).

*Remarque* : Le niveau de pression acoustique de référence  $p_0$  ne correspond pas exactement à l'intensité sonore de référence  $I_0$  de sorte qu'il existe un léger écart entre  $L_p$  et  $L_1$  ; on négligera cet écart. On admet

donc :  $L_1 \cong L_p$  et on en déduit :  $I_0 \cong \frac{p_0^2}{\rho_0 c}$  avec  $\rho_0 = 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$  et  $c = 343 \text{ m.s}^{-1}$  ( $20^\circ \text{C}$ )

#### ► Niveau de puissance acoustique

Le niveau de puissance acoustique ( $L_w$ ) est rapportée à une puissance de référence  $P_0$  :  $L_w = 10 \log \frac{P}{P_0}$

$P_0 = 10^{-12} \text{ W}$  car on pose :  $\frac{P_0}{1 \text{ m}^2} = I_0$

*Remarque importante* : Le niveau de puissance, comme la puissance  $P$ , ne caractérise que la source sonore alors que les niveaux de pression et d'intensité dépendent aussi de la distance à la source.

#### ► Cas de plusieurs sources sonores

Que se passe-t'il en un point  $M$  soumis à l'influence de plusieurs sources sonores distantes les unes des autres et ayant chacune une puissance  $P_i$  ?

♦ les intensités sonores s'additionnent :  $I_{\text{tot}} = \sum_i I_i$

♦ cette dernière condition se traduit par une relation simple donnant la pression acoustique résultante :  $p_{\text{tot}}^2 = \sum_i p_i^2$

♦ Attention ! les niveaux sonores ne s'additionnent pas !

*Remarque* : Les puissances acoustiques, elles, ne s'additionnent que si les sources sonores ont la même localisation.

#### ► Quelques ordres de grandeur :

Voici quelques exemples de niveaux sonores :

Calme absolu	0 dB
Bureau très calme, appartement tranquille	30 dB
Salle de classe calme	40 dB
Restaurant calme, auto passant à 10 m, musique douce	50 dB
Restaurant bruyant, salle de dactylographie	60 dB
Atelier de mécanique ordinaire, conversation difficile	70 dB
Atelier bruyant, rue bruyante	80 dB
Orchestre symphonique, mobylette à 10 m, cantine scolaire	90 dB
Salle de banc d'essai moteur, marteau-piqueur à 2 m	100 dB
Atelier de chaudronnerie, train passant en gare à 2 m	110 dB
Seuil de douleur. Réacteur d'avion à 20 m	120 dB
Seuil intolérable, danger pour l'oreille. Marteau-pilon	130 dB

## SENSATION D'INTENSITE SONORE

Le niveau d'intensité sonore ne représente pas exactement la sensation d'intensité sonore réellement perçue par l'oreille ! Une unité de perception sonore physiologique a été introduite : c'est le phone.

Un phone correspond à un décibel à 1000 Hz.

### ► Diagramme de Fletcher et Munson

*Remarque :* Ce diagramme expérimental, établi pour une oreille moyenne, peut différer notablement d'un individu à l'autre.

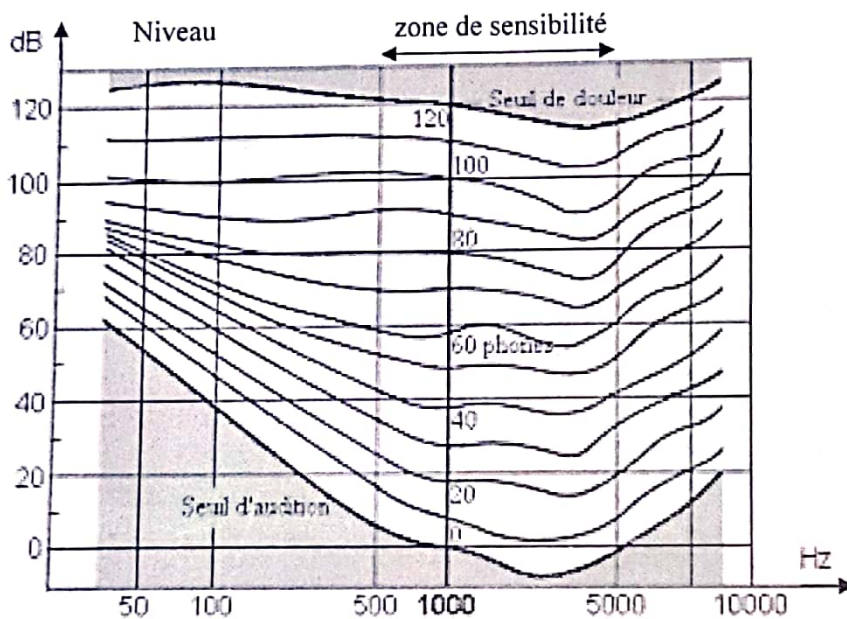
♦ L'oreille humaine n'entend pas de la même façon deux sons de même intensité sonore mais de fréquences différentes. C'est ce qui ressort de l'examen du diagramme ci-dessous établi pour une « oreille moyenne ». Les courbes qui apparaissent sur ce diagramme sont des courbes d'égale sensation sonore (mesurée en phones) encore appelées « courbes isotoniques ».

♦ Le diagramme met en évidence une zone sensible de l'oreille entre 500 Hz et 5000 Hz, en deçà et au-delà de laquelle l'oreille perd graduellement sa sensibilité.

♦ Pour chaque fréquence, il existe un niveau minimum audible pour l'oreille moyenne ; la courbe correspondante constitue le seuil d'audition (0 phone) ; on constate que ce seuil varie en fonction de la fréquence. A 1000 Hz, le seuil d'audition correspond à un niveau d'intensité sonore de 0 dB (voir les définitions des niveaux de pression et d'intensité).

♦ Pour chaque fréquence, il existe, également, un seuil de douleur qui, lui aussi, varie en fonction de la fréquence.

Ce diagramme sert à étalonner les appareils de mesure d'intensité sonore utilisés en technologie du bruit ; ces appareils possèdent, en effet, des filtres de pondération afin de reconstituer au mieux l'effet d'un son sur l'oreille.



## COURBES DE PONDERATION

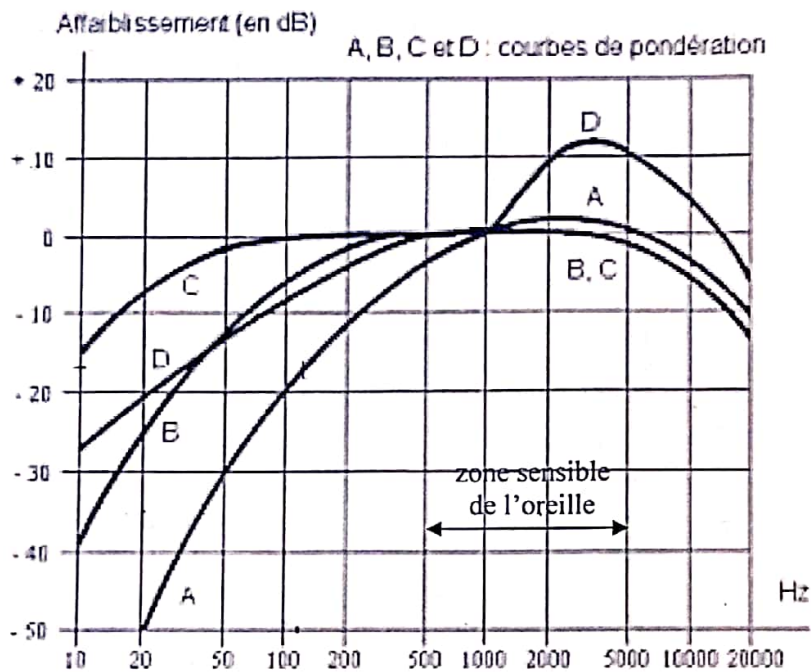
Pour reconstituer cette sensation sonore, on pondère les intensités des bruits en affaiblissant de manière relative les « graves » et les « aigus » situés en dehors de la zone de sensibilité de l'oreille (500 à 5000 Hz).

Cette pondération se fait suivant des courbes normalisées :

- courbe A : pour les niveaux d'intensité sonore plutôt faibles
- courbe B : pour les niveaux d'intensité sonore moyens
- courbe C : pour les niveaux plus élevés
- courbe D : courbe spécifique pour les bruits d'avion.

*Remarque* : Pour les problèmes d'isolation courants, la pondération suivant la courbe A est à peu près la seule utilisée.

Le niveau sonore pondéré A est noté en dB (A) ou dB<sub>A</sub>.



### EXEMPLE DE CALCUL D'UN NIVEAU SONORE PONDERE A

On veut calculer le niveau pondéré A d'un bruit dont on donne l'analyse par bandes d'octaves :

Fréquences médianes (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
$L_1, L_2, \dots$ (dB)	71	70	66	69	68	59
Pondération à appliquer (dB)	-16,1	-8,6	-3,2	0	+1,2	+1,0

#### ► Calcul direct du niveau d'intensité globale

Soient  $I_{1A}, I_{2A}, \dots$  les intensités sonores pondérées dans les différentes bandes d'octave et  $L_{1A}, L_{2A}, \dots$  les niveaux d'intensité correspondants :

$$L_{1A} = L_1 - 16,1 = 54,9 \text{ dB}_A ; L_{2A} = L_2 - 8,6 = 61,4 \text{ dB}_A, \dots$$

Puisque :  $L_{1A} = 10 \log \frac{I_{1A}}{I_0}$ , on a :  $I_{1A} = I_0 10^{\left(\frac{L_{1A}}{10}\right)}$  soit :  $I_{1A} = I_0 10^{(5,49)}$

On a aussi :  $I_{2A} = I_0 10^{\left(\frac{L_{2A}}{10}\right)}$  soit :  $I_{2A} = I_0 10^{(6,14)}$ , ...etc

*Maths* : Si  $\log X = Y$  alors :  $10^{\log X} = 10^Y$  ; Mais :  $10^{\log X} = X$  de sorte que l'on obtient :  $\log X = Y \Leftrightarrow X = 10^Y$

L'intensité sonore totale pondérée  $I_{totA}$  est égale à la somme des intensités sonores des différentes bandes d'octave :  $I_{totA} = I_{1A} + I_{2A} + \dots$  et le niveau d'intensité sonore globale  $L_{1A}$  s'écrit, alors :

$$L_{1A} = 10 \log \frac{I_{totA}}{I_0} = 10 \log \left[ \frac{\sum 10^{\left(\frac{L_{iA}}{10}\right)}}{1} \right]$$

Numériquement, on obtient :

$$L_{1A} = 10 \log [10^{(5,49)} + 10^{(6,14)} + 10^{(6,28)} + 10^{(6,90)} + 10^{(6,92)} + 10^{(6,00)}]$$

On obtient, après calcul, un niveau pondéré :  $L_{1A} \equiv 73 \text{ dB}_A$

*Remarque* : le spectre du bruit analysé ci-dessus est limité alors qu'un bruit a souvent une énergie en dehors des bandes considérées...mais celle-ci est, en général, négligeable pour le calcul du niveau d'intensité globale pondérée A car on sort du domaine de sensibilité de l'oreille.

## EFFETS NOCIFS DU BRUIT

### ► Généralités

Un bruit peut, selon son intensité, sa nature, sa durée diminuer ou détruire la sensibilité de l'oreille. Un bruit de courte durée mais de forte intensité peut entraîner une surdité partielle temporaire ou permanente.

A intensité égale et à durée égale, un son pur est plus traumatisant qu'un son complexe.

A intensité égale, un son continu est mieux supporté qu'un son irrégulier.

Une directive européenne très récente interdit d'exposer sans protection des travailleurs à plus de 87 dB.

A partir de 110 dB, on peut contracter un traumatisme auditif en quelques minutes.

### ► Interposition d'un écran

La réduction d'un niveau sonore en un point donné peut être obtenue en interposant, entre la source S et le point de réception P, un écran acoustique.

La réduction du niveau sonore dépend de la fréquence de l'onde, de l'emplacement de l'écran et de sa hauteur.

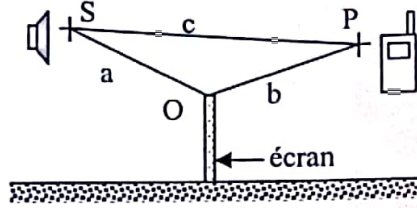
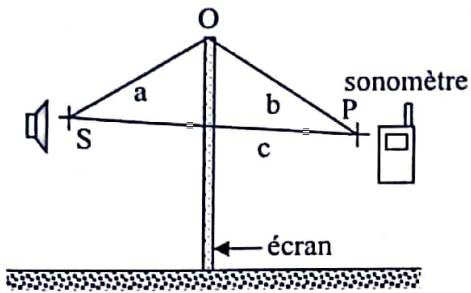
On pose : SO = a ; OP = b et SP = c et  $\delta = a + b - c$

L'atténuation due à l'écran ( $A_e$ ) s'écrit :

$$A_e = L_1 (\text{sans écran}) - L_1 (\text{avec écran})$$

On distingue deux situations :

- ◆ Vu de P, l'écran « cache » la source sonore ; dans ce cas :  $\delta > 0$
- ◆ Vu de P, l'écran ne « cache » pas la source sonore ; dans ce cas :  $\delta < 0$



L'atténuation  $A_e$  est fonction de la fréquence  $f$  du son et de  $\delta$ . On utilise des tables pour calculer l'atténuation.

$\delta$ (en m)	Fréquences (Hz) (bandes d'octaves)					
	125	250	500	1000	2000	4000
- 0,7	0	0	0	0	0	0
- 0,5	0	0	0	0	0	0
- 0,3	1	0	0	0	0	0
- 0,2	1	0	0	0	0	0
- 0,1	2	1	0	0	0	0
- 0,05	4	2	1	1	0	0
0	5	5	5	5	5	5
0,05	6	7	8	10	11	13
0,1	7	8	10	11	14	17
0,2	8	10	11	14	17	19
0,3	9	10	13	16	19	21
0,4	10	11	14	17	20	22
0,5	10	12	15	18	21	23
0,8	11	13	17	19	23	26
1	12	15	18	21	24	27
1,5	14	17	20	23	25	28
2	15	18	21	24	27	29
3	17	20	22	26	28	31
4	18	21	23	27	31	33