

---

# **Cours d'acoustique et mécanique ondulatoire**

I.U.P. GDP Option GET

---

2012–2013



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Notions générales d'acoustique</b>	<b>7</b>
1.1	Introduction . . . . .	7
1.1.1	Généralités . . . . .	7
1.1.2	Petit historique . . . . .	7
1.2	Principes physiques . . . . .	8
1.3	Pression, vitesse particulaire, intensité et puissance acoustique . . . . .	9
1.4	La vitesse du son . . . . .	10
1.5	Fréquence, pulsation, longueur d'onde et nombre d'onde . . . . .	10
1.6	Impédance acoustique . . . . .	11
1.7	Equations de base, Equation de propagation . . . . .	11
1.7.1	Equations de base . . . . .	11
1.7.2	Equation de propagation . . . . .	12
1.8	Les différents types d'ondes . . . . .	12
1.8.1	Aspect ondulatoire . . . . .	12
1.8.2	Ondes planes . . . . .	12
1.8.3	Ondes sphériques . . . . .	13
1.9	Facteur de directivité . . . . .	14
1.10	Superposition et ondes stationnaires . . . . .	14
1.10.1	Ondes stationnaires . . . . .	14
1.11	Les décibels, niveaux sonores et valeurs de référence . . . . .	15
1.12	Manipulation des décibels . . . . .	16
1.13	Analyse spectrale . . . . .	17
1.13.1	Analyse par octave et tiers d'octave . . . . .	17
1.13.2	Analyse en bandes fines . . . . .	18
<b>2</b>	<b>L'oreille humaine</b>	<b>21</b>
2.1	Fonctionnement de l'oreille . . . . .	21
2.2	Sensibilité de l'oreille . . . . .	22
2.3	Niveaux de pression acoustiques pondérés . . . . .	22
2.4	Evaluation de la gêne : le niveau NR . . . . .	23
2.5	Niveaux de bruits équivalents . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Acoustique des salles</b>	<b>27</b>
3.1	Introduction . . . . .	27
3.2	Propagation des ondes dans un local clos . . . . .	27
3.2.1	Réflexion des ondes sonores . . . . .	27
3.2.2	Echo et réverbération . . . . .	27
3.2.3	Champs acoustique réverbéré . . . . .	29
3.3	Absorption acoustique . . . . .	29
3.3.1	Facteur d'absorption acoustique d'un matériau . . . . .	29
3.3.2	Aire d'absorption équivalente d'un local . . . . .	30

3.4	Niveau de pression dans un local . . . . .	30
3.4.1	Pression acoustique efficace réverbérée . . . . .	30
3.4.2	Pression acoustique efficace du champs direct . . . . .	30
3.4.3	Champs acoustique mixte . . . . .	31
3.5	Temps de réverbération . . . . .	31
3.5.1	Définition . . . . .	31
3.5.2	Formule de Sabine . . . . .	32
3.5.3	Mesure du <b>TR</b> . . . . .	32
3.5.4	Prévision du <b>TR</b> . . . . .	32
3.6	Les matériaux absorbants . . . . .	33
3.6.1	Les matériaux poreux . . . . .	33
3.6.2	Les résonateurs de Helmholtz . . . . .	33
3.7	Diaphragmes ou panneaux fléchissants . . . . .	34
3.8	Conclusion . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Isolation acoustique</b> . . . . .	<b>35</b>
4.1	Introduction . . . . .	35
4.2	Généralités . . . . .	35
4.2.1	Principaux types de propagation . . . . .	35
4.2.2	Principaux types de transmission . . . . .	35
4.3	Définitions . . . . .	36
4.3.1	Bruit aérien, bruit solidien . . . . .	36
4.3.2	Isolement acoustique normalisé en dB(A) . . . . .	36
4.3.3	Isolement acoustique brut entre deux locaux : <b>D<sub>b</sub></b> . . . . .	36
4.3.4	Isolement acoustique normalisé <b>D<sub>n</sub></b> . . . . .	37
4.3.5	Indice d'affaiblissement acoustique <b>R</b> . . . . .	37
4.3.6	Comparaison entre <b>R</b> et <b>D<sub>n</sub></b> . . . . .	38
4.3.7	Niveau de bruit de choc normalisé . . . . .	38
4.4	Transmission du son à travers une paroi simple . . . . .	38
4.4.1	Loi de masse . . . . .	38
4.4.2	Loi de fréquences . . . . .	38
4.5	Transmission du son à travers une paroi double . . . . .	39
4.6	Indice d'affaiblissement acoustique d'une paroi hétérogène . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Mécanique ondulatoire</b> . . . . .	<b>41</b>
5.1	Systèmes vibratoires élémentaires . . . . .	41
5.1.1	Système masse-ressort . . . . .	41
5.1.2	Résonateurs de Helmholtz . . . . .	41
5.2	Oscillations libres . . . . .	42
5.2.1	Vibration mécanique . . . . .	42
5.2.2	Vibration acoustique . . . . .	42
5.3	Oscillations forcées . . . . .	43
5.3.1	Définition . . . . .	43
5.3.2	Résonance . . . . .	44
5.3.3	Facteur de qualité . . . . .	44
5.4	Impédance mécanique . . . . .	44
5.4.1	Vitesse vibratoire . . . . .	44
5.4.2	Formule d'impédance . . . . .	45
5.5	Oscillateurs couplés . . . . .	45
5.5.1	Définition . . . . .	45
5.5.2	Exemple . . . . .	45
5.5.3	Modes de vibration . . . . .	45

<b>6</b>	<b>Microphones et haut-parleurs</b>	<b>47</b>
6.1	Introduction . . . . .	47
6.2	Transduction électrodynamique . . . . .	47
6.2.1	Microphone . . . . .	48
6.2.2	Haut-parleur . . . . .	48
6.2.3	Couplage électroacoustique . . . . .	49
6.2.4	Résumé . . . . .	49
6.3	Transduction électrostatique . . . . .	50
6.3.1	Principe du condensateur . . . . .	50
6.3.2	Application à la transduction . . . . .	51
6.3.3	Résumé . . . . .	51
6.4	Caractéristiques des microphones . . . . .	52
6.4.1	Sensibilité . . . . .	52
6.4.2	Réponse en fréquence . . . . .	53
6.4.3	Directivité . . . . .	54



# Chapitre 1

## Notions générales d'acoustique

### Sommaire

---

1.1	Introduction . . . . .	7
1.2	Principes physiques . . . . .	8
1.3	Pression, vitesse particulaire, intensité et puissance acoustique . . . . .	9
1.4	La vitesse du son . . . . .	10
1.5	Fréquence, pulsation, longueur d'onde et nombre d'onde . . . . .	10
1.6	Impédance acoustique . . . . .	11
1.7	Equations de base, Equation de propagation . . . . .	11
1.8	Les différents types d'ondes . . . . .	12
1.9	Facteur de directivité . . . . .	14
1.10	Superposition et ondes stationnaires . . . . .	14
1.11	Les décibels, niveaux sonores et valeurs de référence . . . . .	15
1.12	Manipulation des décibels . . . . .	16
1.13	Analyse spectrale . . . . .	17

---

### 1.1 Introduction

#### 1.1.1 Généralités

Plus de la moitié des Français placent le bruit au premier rang des nuisances qu'ils subissent, spécialement en milieu urbain. Définition du bruit (Agence Française de Normalisation) : *"On appelle bruit tout phénomène acoustique provoquant une sensation considérée comme désagréable ou gênante"*. L'étude de la réduction des nuisances sonores est un enjeu industriel capital et fait l'objet de recherches dans bien des domaines :

Ferroviaire	Bruit intérieur, intelligibilité de la parole, murs antibruits
Automobile	Contact pneu/route, boîtes de vitesses, équipement intérieur
Aéronautique	Bruit dû à la friction de l'air, réduction du bruit des réacteurs
Militaire	Sonars, détection
Médical	étude des ultrasons
BTP	Matériaux isolants, double parois, faux plafonds, etc...

#### 1.1.2 Petit historique

Les premières études des phénomènes sonores remontent à la Grèce Antique. Les philosophes de l'école pythagoricienne considéraient le monde comme une "Harmonie Universelle", exprimant ainsi que l'univers est musique comme le déclarait Hermes : "la musique est

la connaissance de l'ordre des choses".

Leurs travaux, dans lesquels l'aspect musical et physique étaient confondus, leur permit de découvrir qu'il existait une relation entre la longueur d'une corde et la hauteur du son émit par elle. Ils établirent également les intervalles remarquables entre les différentes hauteurs de sons. Ces intervalles définissent la relation entre les différentes notes d'un accord (tierce, quinte, octave...). On leur doit également les premières réalisations d'acoustiques architecturales avec les célèbres amphithéâtres nommés epidaures. Ces ouvrages permettent à l'orateur de se faire entendre d'un grand nombre de personnes en utilisant simplement une géométrie particulière.

Il faut attendre le XVII<sup>ème</sup> siècle, avec le développement de la mécanique, pour que l'acoustique se détache de l'art musical et devienne une science des phénomènes sonores. Le problème de la corde vibrante fut le premier à être résolu et constitue une base sur lesquels les physiciens de l'époque construisirent la théorie acoustique. Ce fut Mersenne qui dans son ouvrage "Harmonicorum Liber" (1636) donna en premier les relations mathématiques reliant la fréquence, la longueur d'onde, la tension de la corde et la masse. Peu de temps après Bernoulli (1700-1782) démontra que le mouvement de la corde pouvait être décomposé en une somme de mouvements simples. Ce que Fourier (1768-1831) immortalisa dans son célèbre théorème portant son nom.

Outre le problème de la corde vibrante la question de la vitesse de propagation du son a également passionné les scientifiques de l'époque. Les valeurs, expérimentales allaient de 450 m/s à 332 m/s. La dépendance de cette grandeur aux conditions atmosphériques fut également dégagée.

L'histoire de l'acoustique se mélange parfois avec celle de la lumière, en particulier lorsque Huygens dans le "Traité de la lumière" (1690) donna une explication complète des phénomènes sonores et lumineux. C'est avec l'ouvrage de Lord Rayleigh (1842-1919) que l'acoustique moderne est instituée. Ce livre demeure malgré d'importantes avancées, une référence.

## 1.2 Principes physiques

Le son est produit par une vibration : tout élément matériel qui se déplace alternativement engendre une vibration de l'air, se traduisant par des compressions et des dilatations. On observe :

- une modification de la pression.
- un mouvement vibratoire de l'air.

De proche en proche, la vibration se propage d'une molécule à l'autre : c'est la propagation. Pour qu'il puisse y avoir propagation d'une onde acoustique, il faut un milieu matériel (le son ne se propage pas dans le vide) :

- dans les fluides (air, eau, ...), les ondes sont de type longitudinales : le mouvement des particules s'effectue dans le sens de la propagation.
- dans les solides, la présence de forces de cisaillement dues à la structure microscopique de ces éléments entraîne des ondes transversales, s'ajoutant aux ondes longitudinales.

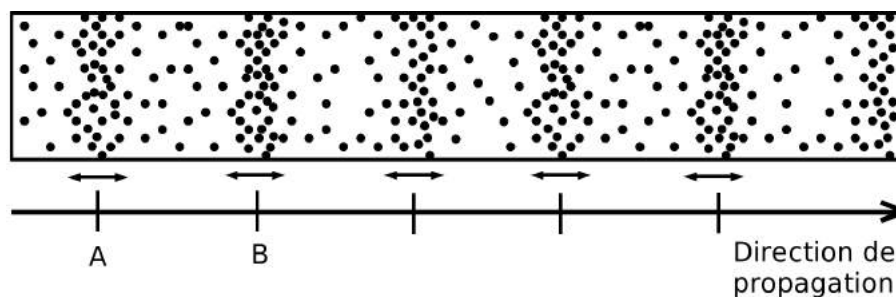


FIGURE 1.1 – Ondes longitudinales



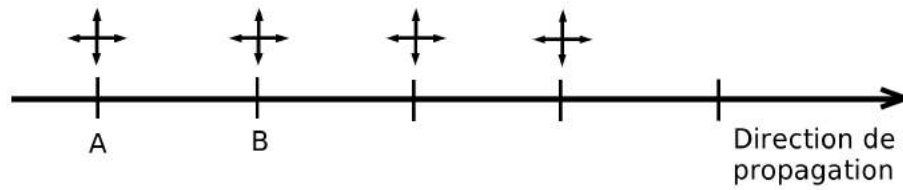


FIGURE 1.2 – Les deux types d’ondes dans les solides : longitudinales et transversales

### 1.3 Pression, vitesse particulaire, intensité et puissance acoustique

Les vibrations acoustiques dans l’air se traduisent en un point par des fluctuations rapides de la pression autour de la pression atmosphérique  $P_0$  (pression statique). On a donc :

$$P_{\text{total}} = P_0 + p(t) \quad (1.1)$$

où  $p(t)$  est la pression acoustique. L’oreille n’est sensible qu’aux fluctuations de pression, c’est-à-dire à  $p(t)$ . Les ordres de grandeurs de  $P_0$  et  $p(t)$  sont très différents : la pression statique  $P_0$  est (sous conditions atmosphériques classiques) égale à  $1.013 \cdot 10^5$  Pa, alors que les fluctuations acoustiques dépassent rarement quelques dizaines de Pa. La pression efficace  $p_{\text{eff}}$  entre les instant  $t_1$  et  $t_2$  est définie par :

$$p_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt \quad (1.2)$$

Dans le cas d’un son pur (une seule fréquence), on montre que la pression efficace est :

$$p_{\text{eff}} = \frac{p_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \quad (1.3)$$

La *vitesse particulaire* est la vitesse instantanée des particules d’air, notée  $u(t)$ . Alors que  $p(t)$  est une grandeur scalaire, la vitesse particulaire est une quantité vectorielle (une composante pour les trois directions de l’espace).

**Remarque :** Il ne faut pas confondre la vitesse particulaire avec la vitesse de propagation. Cette dernière grandeur caractérise la vitesse de propagation de la perturbation ( $c_0 = 343$  m/s dans l’air), soit un transport d’énergie, alors que la vitesse particulaire (de l’ordre d’1 m/s) caractérise un mouvement de matière.

La pression acoustique n’est pas une donnée suffisante pour décrire totalement une source sonore, car elle ne donne pas d’indication sur l’énergie acoustique totale émise. On introduit donc la notion d’*intensité acoustique*. Par définition, l’intensité acoustique est l’énergie acoustique qui traverse une unité de surface par unité de temps (flux de puissance) :  $W/m^{-2}$ . En général, on cherche une composante selon une direction donnée. En pratique, on s’intéressera à la valeur moyenne dans le temps de l’intensité instantanée (c’est elle qu’on appelle par abus de langage “intensité”).

$$\vec{I} = p \cdot \vec{u} \quad (1.4)$$

Pour connaître la *puissance acoustique* totale rayonnée par une source (haut-parleur, machine, ...) à travers une surface  $S$  donnée, il faut intégrer  $\vec{I}$  sur cette surface :

$$W = \int_S \vec{I} dS \quad (1.5)$$

En pratique, on discrétise l’espace en  $n$  parcelles de surface identique  $\Delta S$ , en prenant la valeur moyenne de l’énergie traversant chacune de ces parcelles :

$$W = \Delta S \cdot \sum_n \vec{I}_n \quad (1.6)$$

## 1.4 La vitesse du son

La vitesse du son, généralement notée  $c_0$ , dépend du milieu de propagation, ainsi que de l'état de ce milieu. Dans l'air, la vitesse de propagation dépend principalement de la température (voir tableau 1.1) ; on a approximativement :

$$c_0 = 20.05\sqrt{T} \quad (1.7)$$

où  $T$  est la température en Kelvin.

Température [°C]	$c_0$ [m.s <sup>-1</sup> ]
-10 °C	325.2 m.s <sup>-1</sup>
0 °C	331.4 m.s <sup>-1</sup>
10 °C	337.3 m.s <sup>-1</sup>
20 °C	343.2 m.s <sup>-1</sup>
30 °C	349.0 m.s <sup>-1</sup>

TABLE 1.1 – Vitesse du son dans l'air en fonction de la température

**Note :** dans les solides, les deux types d'ondes (longitudinales et transversales) ont des célérités différentes.

## 1.5 Fréquence, pulsation, longueur d'onde et nombre d'onde

La fréquence est le nombre de fluctuations par seconde. Elle est exprimée en Hertz (Hz). L'oreille est sensible aux sons entre 20 et 20000 Hz (voir tableau 1.2). On distingue plusieurs

< 20 Hz	20 à 500 Hz	500 à 2000 Hz	2000 à 20000 Hz	> 20000 Hz
Infrasons	Basses	Médiums	Aigus	Ultrasons

TABLE 1.2 – Les différentes gammes de fréquences.

classes de sons en fonction de leur *contenu fréquentiel* :

- Les sons *purs* :  $p(t)$  varie de façon sinusoïdale, à une fréquence  $f$ . Un son pur ne contient donc qu'une seule fréquence (voir figure 1.3)
- Les son *périodiques* : le signal temporel est périodique. En fréquence, on peut décrire le signal comme la somme de différentes fréquences (somme de plusieurs sons purs). Les sons d'un violon ou celui d'une voyelle longue sont des exemples de sons périodiques
- Les sons *non périodiques* : si le signal n'est pas constitué d'un motif qui se répète, on dit qu'il est non périodique. Cela concerne par exemple les bruits d'impact.
- *Bruits* : le bruit est une variation aléatoire de la pression acoustique : aucune périodicité dans le signal et pas de hauteur (ou fréquence) précise. Les bruits les plus courants sont le bruits blanc (même énergie pour toutes les fréquences) et le bruit rose (même énergie pour toutes les bandes de fréquences).

La *pulsation*, notée  $\omega$  est relié à la fréquence  $f$  par  $\omega = 2\pi f$ . L'unité de la pulsation est le radian  $\cdot$  s<sup>-1</sup>. On utilise parfois la pulsation plutôt que la fréquence pour des raisons pratiques, mais elles diffèrent uniquement par un facteur  $2\pi$ .

La *longueur d'onde*, notée  $\lambda$ , dépend de la fréquence  $f$  et de la vitesse du son  $c_0$  :

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \quad (1.8)$$

Son unité est le mètre ;  $\lambda$  représente le nombres d'oscillations par mètre.

**Remarque :** la longueur d'onde dépendant de la vitesse du son, on voit qu'un son a une

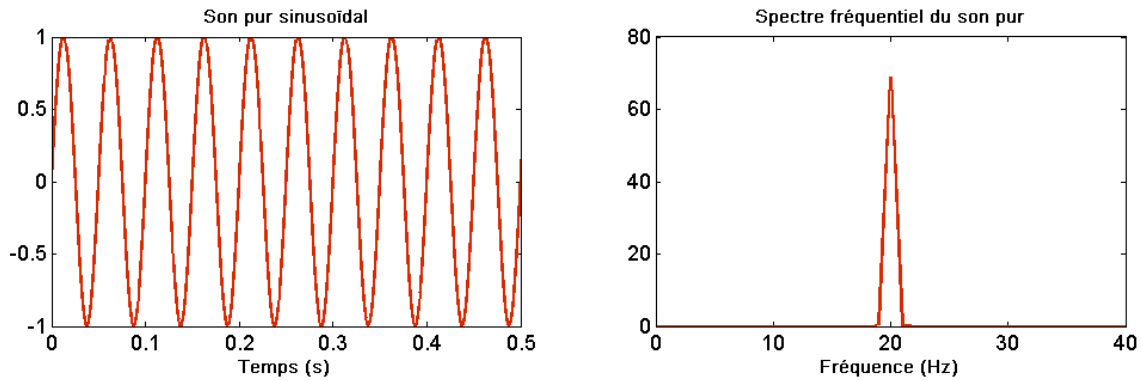


FIGURE 1.3 – Exemple de son pur (à gauche) et son contenu fréquentiel (à droite)

longueur d'onde différente suivant le milieu on l'on se trouve. Par exemple, pour un son de fréquence  $f = 500$  Hz :

1. Dans l'air :  $c_0 = 340 \text{ m.s}^{-1} \rightarrow \lambda = \frac{c_0}{f} = \frac{340}{500} = 68 \text{ cm}$
2. Dans l'eau :  $c_0 = 1500 \text{ m.s}^{-1} \rightarrow \lambda = \frac{c_0}{f} = \frac{340}{1500} = 22.6 \text{ cm}$

Une oscillation complète se fera donc sur une distance environ trois fois plus grande dans l'air que dans l'eau.

Le *nombre d'ondes*, noté  $k$ , est défini par :

$$k = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.9)$$

L'unité du nombre d'ondes est le mètre.

**Remarques :** Toutes les quantités étudiés dans cette section sont intimement reliées par la célérité des ondes. On peut facilement obtenir (entre autre) :

$$k = \frac{2\pi f}{c_0}$$

## 1.6 Impédance acoustique

L'impédance acoustique est la quantité qui relie la pression acoustique et la vitesse particulière. Cette grandeur peut être un nombre complexe. Elle est caractéristique de la manière dont un matériau réagit à une onde acoustique. On a :

$$Z = \frac{p}{u} \quad (1.10)$$

## 1.7 Equations de base, Equation de propagation

### 1.7.1 Equations de base

L'acoustique se base sur différentes lois fondamentales dont le principe est "absolu". Ces dernières sont la Conservation de la masse, l'équation d'Euler, et l'équation d'état. En se plaçant dans le cadre de l'approximation linéaire, sans aucune source et pour un fluide adiabatique ces relations s'écrivent :

- la conservation de la masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \text{div}(\vec{u}) = 0 \quad (1.11)$$

## - l'équation d'Euler

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{grad}(p) = 0 \quad (1.12)$$

## - l'équation d'état

$$p = \rho C_0^2 \quad (1.13)$$

où les grandeurs  $\rho$ ,  $c_0$ ,  $p$  et  $u$  représentent respectivement la densité volumique du fluide, la célérité de l'onde, la pression et la vitesse particulière acoustique. L'équation (1.2) nous donne directement la relation entre la vitesse et la pression. Pour une onde plane harmonique cette relation s'écrit :  $j\omega\rho u = -\nabla p$

## 1.7.2 Equation de propagation

En manipulant ces différentes équations on obtient l'équation de propagation ainsi :  
A l'aide de l'équation (1.13) on remplace l'expression de  $\rho$  dans (1.11) :

$$\frac{1}{C_0^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 \operatorname{div}(\vec{u}) = 0$$

puis il suffit de faire la différence entre  $\operatorname{div}((1.12))$

$$\operatorname{div}(\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{grad}(p)) = \rho_0 \operatorname{div}(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t}) + \operatorname{div}(\vec{grad}(p)) = \rho_0 \frac{\partial \operatorname{div}(\vec{u})}{\partial t} + \Delta p = 0,$$

et  $\partial_t(1.11)'$  :

$$\partial_t(\frac{1}{C_0^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 \operatorname{div}(\vec{u})) = \frac{1}{C_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \rho_0 \frac{\partial \operatorname{div}(\vec{u})}{\partial t} = 0,$$

pour obtenir l'équation suivante :

$$\Delta p - \frac{1}{C_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1.14)$$

## 1.8 Les différents types d'ondes

## 1.8.1 Aspect ondulatoire

On appelle surface d'onde (ou front d'onde) l'ensemble des points qui vibrent en phase. Elle est en tout point normale à la direction de propagation (et donc à la vitesse particulière). A chaque valeur de la phase (référéncée par rapport à une origine quelconque) est associée une surface d'onde. On appelle rayon sonore la courbe issue d'une source qui est en tout point normale aux surface d'onde (c'est l'équivalent d'un trajet lumineux en optique). On distingue principalement 2 types d'ondes : les ondes planes et les ondes sphériques.

## 1.8.2 Ondes planes

Dans le cas des ondes planes, les surfaces d'ondes sont des plans parallèles et les rayons sonores sont des lignes normales à ces plans. Exemple : la propagation d'ondes planes dans un tuyau. Soit un cylindre infiniment long, muni d'un piston vibrant. On démontre que toutes les particules situées dans le plan normal à l'axe du tube passant par A (distance  $x$  de l'origine) vibrent exactement comme le piston, mais avec un "retard de phase" dû au temps  $\tau = x/c_0$

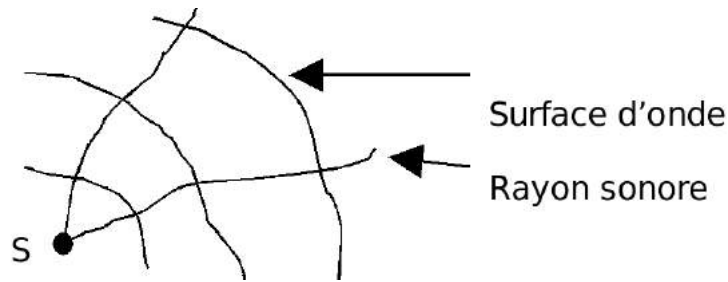


FIGURE 1.4 – Surface d'onde et rayons

que met l'onde pour se propager de O à A. Par exemple, si la vitesse particulière en O est  $v(0, t) = U_{max} \cos(\omega t)$ , alors en A,  $u(x, t) = U_{max} \cos(\omega t - \omega x/c_0) = U_{max} \cos(\omega t - kx)$ . Pour les plans séparés par une longueur d'onde  $\lambda = c_0/f$ , la phase est au même "état de pression". Une propriété importante des ondes planes :  $p$  et  $u$  sont proportionnelles et  $p(x, t) = \rho_0 c_0 u(x, t)$ , avec  $\rho_0 c_0$  impédance caractéristique de l'air, c'est à dire l'impédance d'un milieu vis-à-vis d'une onde plane. On a donc :

$$\vec{I} = p \cdot \vec{u} = \frac{p^2}{\rho_0 c_0} \vec{e}_x \quad (1.15)$$

où  $\vec{e}_x$  est le vecteur unitaire dans la direction de propagation  $x$

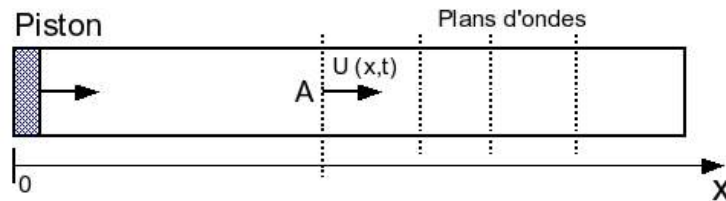


FIGURE 1.5 – Onde plane

### 1.8.3 Ondes sphériques

Les surfaces d'ondes sont des sphères concentriques. La source sphérique idéale est schématisée par une sphère solide située en O, qui se contracte et se dilate au cours du temps autour d'une valeur moyenne de son rayon (sphère pulsante – monopole). On démontre que toutes les particules situées en un point M à une distance assez grande de la source (pour laquelle la source est assimilable à un point), vibrent avec une amplitude proportionnelle à  $1/r$ ,  $r$  étant la distance OM, et avec un retard de phase  $kr$ . A partir d'une distance assez grande de la source

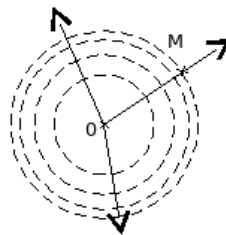


FIGURE 1.6 – Onde sphérique

par rapport à la longueur d'onde, on peut assimiler le front d'onde sphérique à un front d'onde plan (la source est alors assimilée à une onde plane).

## 1.9 Facteur de directivité

On appelle facteur de directivité  $Q$  de la source suivant une direction, le rapport entre l'intensité dans cette direction sur l'intensité moyenne sur la sphère de rayon  $r$ .

$$Q = \frac{I}{I_{moy}} \quad (1.16)$$

Pour une onde sphérique :

$$Q = \frac{I}{W/4\pi r^2} \quad (1.17)$$

Pour la pression, on obtient :

$$p^2(M) = I\rho_0 c_0 = \rho_0 c_0 \frac{WQ}{4\pi r^2} \quad (1.18)$$

On appelle *source omnidirectionnelle* une source acoustique dont le facteur de directivité  $Q$  est égal à 1 dans toute les directions. La source rayonne la même quantité d'énergie dans toutes les directions.

## 1.10 Superposition et ondes stationnaires

Lorsque  $N$  sources engendrent séparément en un point  $A$  les pressions  $p_1(t) + p_2(t) + \dots + p_N(t)$ , la pression acoustique efficace résultante  $p(t)$  est :

$$p_{eff}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [p_1(t) + p_2(t) + \dots + p_N(t)]^2 dt \quad (1.19)$$

Dans le cas de deux sources on a :

$$p_{eff}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [p_1(t)^2 + 2p_1(t)p_2(t) + p_2(t)^2] dt \quad (1.20)$$

- si les 2 sources sont décorrélées (pas de relation entre elles), alors l'intégrale des produits croisés est nulle et :

$$p_{eff}^2 = p_{1,eff}^2 + p_{2,eff}^2 \quad (1.21)$$

- si les bruits sont corrélés, l'intégrale est non-nulle (c'est le cas lors de la somme d'un bruit et du même bruit réfléchi sur un obstacle) et dans ce cas :
  - si  $p_1$  et  $p_2$  sont deux sons purs de mêmes amplitudes et phases :

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t) = 2p_1(t) \text{ donc } p_{eff}^2 = 4p_{1,eff}^2 \quad (1.22)$$

- si  $p_1$  et  $p_2$  ont la même amplitude, mais sont en opposition de phase

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t) = 0 \text{ donc } p_{eff}^2 = 0 \quad (1.23)$$

Ce dernier exemple traduit le principe de l'antibruit, ou contre-bruit, qui consiste à sommer la pression acoustique existant avec la même pression en opposition de phase, de manière à l'annuler (contrôle actif du bruit).

### 1.10.1 Ondes stationnaires

Les ondes stationnaires se produisent lorsqu'une onde sinusoïdale est émise dans un milieu clos (tuyau, local fermé...). L'onde émise (onde incidente) se propage dans le milieu, puis se réfléchit à son extrémité (onde réfléchie). En chaque point, la vibration totale est donc la somme de deux ondes qui se propagent en sens inverse. Selon l'endroit, les deux ondes peuvent être en phase ou en opposition de phase, ce qui correspond à des nœuds ou des ventres de vibration. Notons que la position de ces ventres ou nœuds ne varie pas au cours du temps. Les conditions limites et les propriétés physiques du milieu imposent que seules certaines ondes peuvent exister dans le milieu : ce sont les fréquences propres (ou modes propres) du système.

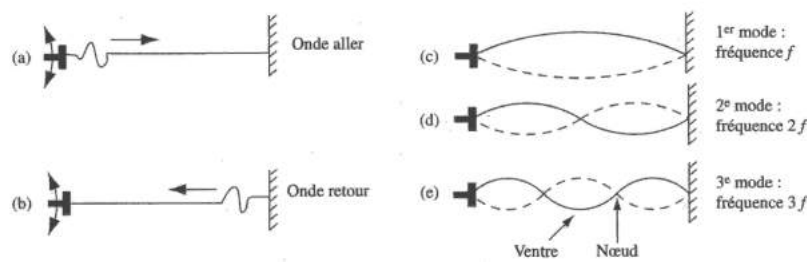


Fig. I.20. Ondes stationnaires sur une corde.

FIGURE 1.7 – Exemple d'onde stationnaire sur une corde

## 1.11 Les décibels, niveaux sonores et valeurs de référence

Le Bel (noté B) a été créé par les ingénieurs du laboratoire Bell dans les années 1920. Le décibel (dB, un dixième de Bell) est une mesure du rapport entre deux valeurs. Il est très utilisé dans des domaines comme l'acoustique, la physique et l'électronique. C'est une unité sans dimension, comme le pourcentage. Le niveau de pression acoustique en dB est exprimé par :

$$L_p = 10 \log \left( \frac{p_{eff}^2}{p_0^2} \right) \quad (1.24)$$

où  $p_0$  est une pression de référence et est égale à  $20 \mu$  Pa. Cette valeur correspond au seuil d'audition (0 dB) à 1000 Hz.

### Pourquoi utiliser les décibels ?

Il y a deux raisons principales :

- Pour des raisons pratiques : le bruit le plus faible audible a une pression de 0.00002 Pa ; le seuil de douleur est quant à lui égal à 200 Pa. On utilise donc une échelle logarithmique pour réduire l'étendue des valeurs.
- Pour des raisons physiologiques : l'échelle logarithmique est plus proche du ressenti que l'échelle linéaire : 1dB correspond à la plus petite variation détectable par l'oreille humaine.

### Petit rappel sur les logarithmes :

$$\begin{aligned} \log(a \cdot b) &= \log(a) + \log(b) \\ \log\left(\frac{a}{b}\right) &= \log(a) - \log(b) \\ \log(a^n) &= n \log(a) \end{aligned}$$

De même on peut définir des niveaux d'intensité acoustique et des niveaux de puissance acoustique :

$$\begin{aligned} L_I &= 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) \text{ avec } I_0 = \frac{p_0^2}{\rho_0 c_0} = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2} \\ L_W &= 10 \log \left( \frac{W}{W_0} \right) \text{ avec } W_0 = I_0 \cdot 1 \text{ m}^2 = 10^{-12} \text{ W} \end{aligned}$$

**Remarque :** Il faut bien préciser, lorsque l'on donne un niveau en dB, s'il s'agit d'un niveau de pression ( $L_p$ ), d'intensité ( $L_I$ ), ou de puissance ( $L_W$ ) sonore.

Pour une onde sphérique on a (voir section 1.8.3) :

$$p^2 = \rho_0 c_0 \frac{WQ}{4\pi r^2} \quad (1.25)$$

ce qui donne la relation entre  $L_p$  et  $L_W$  :

$$L_p = L_W - 10 \log(4\pi r^2) + 10 \log(Q) \quad (1.26)$$

En acoustique, il ne sert à rien de donner un niveau sonore en dB avec dix chiffres après la virgule... Quelques ordres de grandeur :

Niveau en dB	Sensation sonore	Exemples
0	Silence inhabituel	Seuil d'audibilité
10	Très calme	Studio d'enregistrement
20	Très calme	Jardin calme
30	Jugé calme si on est actif	Bibliothèque
40	Jugé calme si on est actif	Bureau tranquille
50	Modéré	Bureau
60	Génant(pour un travail intellectuel)	Parole normale à 1 m
70	Assez fort	Rue passagère
80	Fort	Hall de gare
90	Seuil lésionnel si 8 heures par jour	Atelier de mécanique
100 – 120	Désagréable	Presse, marteau piqueur
130 – 140	Douleur	Réacteur d'avion
> 140	Déchirure du tympan possible	Fusée

TABLE 1.3 – Ordres de grandeurs des niveaux sonores

## 1.12 Manipulation des décibels

Les niveaux sont ajoutés en terme d'énergie. Une pression au carré est proportionnelle à une énergie.

**Ne jamais ajouter des décibels directement !**

Quelques exemples (voir également le tableau 1.4) :

- La pression est doublée :

$$\begin{aligned} p_2 &= 2p_1 \\ p_2^2 &= 4p_1^2 \\ L_{p_2} &= 10 \log\left(\frac{p_2^2}{p_0^2}\right) = 10 \log\left(\frac{4p_1^2}{p_0^2}\right) = L_{p_1} + 10 \log(4) \\ &= L_{p_1} + 6dB \end{aligned}$$

- Deux bruits de même amplitude, en opposition de phase :

$$\begin{aligned} p_2 &= -p_1 \\ p_{tot} &= 0 \\ L_{p_{tot}} &= -\infty dB \end{aligned}$$



Multiplier la grandeur physique par	Revient à ajouter au niveau initial
2	3 dB
3	5 dB
4 (2 x 2)	6 dB (3 + 3)
5	7 dB
6 (2 x 3)	8 dB (3 + 5)
7	8.5 dB
8 (2 x 2 x 2)	9 dB (3 + 3 + 3)
9 (3 x 3)	9.5 dB
10	10 dB
100	20 dB
3/2	2 dB (5 - 3)

TABLE 1.4 – Relations entre grandeurs physiques et dB

## 1.13 Analyse spectrale

Le niveau global d'un bruit dans toute la gamme de fréquences audibles est généralement une information insuffisante. Il est important de connaître plus précisément la composition spectrale (c'est-à-dire la contribution de chaque fréquence ou bande de fréquence composant le bruit). Le spectre d'un signal est le résultat du calcul d'une intégrale (intégrale de Fourier) permettant de passer d'une fonction temporelle à une fonction fréquentielle (spectrale). Ce résultat est généralement obtenu à l'aide d'un algorithme FFT (Fast Fourier Transform) qui permet de réduire considérablement le temps de calcul. L'utilisation d'un tel algorithme nécessite d'effectuer sur le signal à analyser un certain nombre d'opérations qui entraînent quelques modifications entre le spectre calculé et le spectre réel. L'analyse fréquentielle est tout d'abord la décomposition en un certain nombre de composantes sinusoïdales à différentes fréquences du signal temporel d'origine : on obtient donc un spectre discret ( $\Delta f = 1/T$ ).

On utilise 3 types d'analyse :

1. l'analyse en bandes larges (par octave ou tiers d'octave) :  $\Delta f/f = \text{cte}$
2. l'analyse en bandes fines :  $\Delta f = \text{cte}$

Le choix d'un type d'analyse dépend du phénomène à étudier et surtout de la finalité de la mesure. Par exemple, pour des sons harmoniques, on utilisera une analyse bandes fines, alors que pour des bruits, on se contentera d'une analyse large bande.

### 1.13.1 Analyse par octave et tiers d'octave

On applique au signal de pression acoustique des filtres normalisés de bandes d'octave ou de bandes de 1/3 d'octave. Les filtres utilisés en analyse acoustique sont alors des filtres analogiques passe-bande en parallèles à largeur de bande relative constante, c'est-à-dire que la bande passante des filtres est proportionnelle à leur fréquence centrale. Le filtre normalisé de référence est centré sur la fréquence 1000 Hz. Ces filtres sont définis par leur fréquence centrale  $f_c$  et leurs fréquences de coupure inférieure  $f_{inf}$  et supérieure  $f_{sup}$  (coupure à -3dB).

- Par octave :

$$\begin{aligned}
 f_{sup} &= 2f_{inf} \\
 f_c &= \sqrt{2}f_{inf} = \frac{f_{sup}}{\sqrt{2}} = \sqrt{f_{sup} \cdot f_{inf}}
 \end{aligned}
 \tag{1.27}$$

Exemple :

$$f_c = 1000 \text{ Hz} \rightarrow \begin{cases} f_{inf} = 707.1 \text{ Hz} \\ f_{sup} = 1414.2 \text{ Hz} \end{cases}
 \tag{1.28}$$

- Par tiers d'octave :

$$f_{sup} = \sqrt[3]{2} f_{inf} \quad (1.29)$$

Exemple :

$$f_c = 250 \text{ Hz} \rightarrow \begin{cases} f_{inf} = 222.7 \text{ Hz} \\ f_{sup} = 280.6 \text{ Hz} \end{cases} \quad (1.30)$$

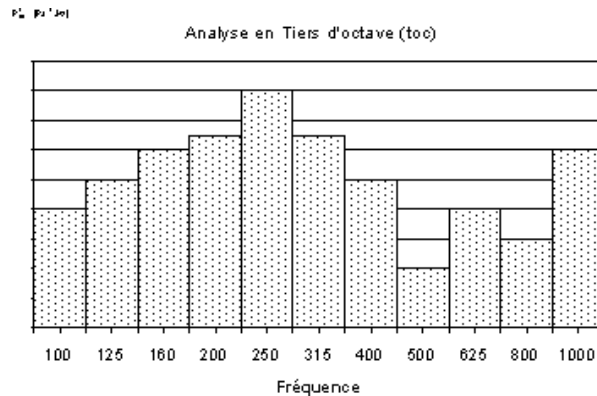


FIGURE 1.8 – Exemple de spectre en tiers d'octave

**Remarque :** Les bandes d'octave et de tiers d'octaves sont normalisées avec l'une d'elles centrée sur  $f_c = 1000 \text{ Hz}$ .

Calcul de l'énergie :

$$p_{eff, bande}^2 = \int_{f_{inf}}^{f_{sup}} p_{eff}^2(f) df = \sum_{f=f_{inf}}^{f_{sup}} p_{eff}^2 \Delta f \quad (1.31)$$

Calcul du niveau de pression :

$$L_p = 10 \log \left( \frac{p_{eff}^2}{p_0} \right) \quad (1.32)$$

Le niveau total en dB est donné par :

$$L_p = 10 \log \left( \sum_i 10^{\frac{L_{p,i}}{10}} \right) \quad (1.33)$$

### 1.13.2 Analyse en bandes fines

A chaque fréquence correspond une énergie.

Calcul du niveau de pression :

$$L_p = 10 \log \left( \int_0^{f_{max}} 10^{\frac{L_p(f)}{10}} df \right) \quad (1.34)$$

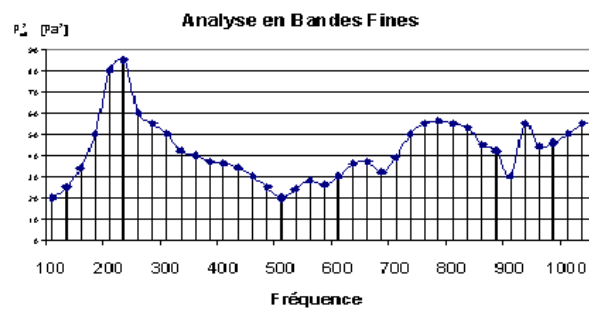


FIGURE 1.9 – Exemple de spectre en bandes fines



# Chapitre 2

## L'oreille humaine

### Sommaire

---

2.1	Fonctionnement de l'oreille . . . . .	21
2.2	Sensibilité de l'oreille . . . . .	22
2.3	Niveaux de pression acoustiques pondérés . . . . .	22
2.4	Evaluation de la gêne : le niveau NR . . . . .	23
2.5	Niveaux de bruits équivalents . . . . .	25

---

### 2.1 Fonctionnement de l'oreille

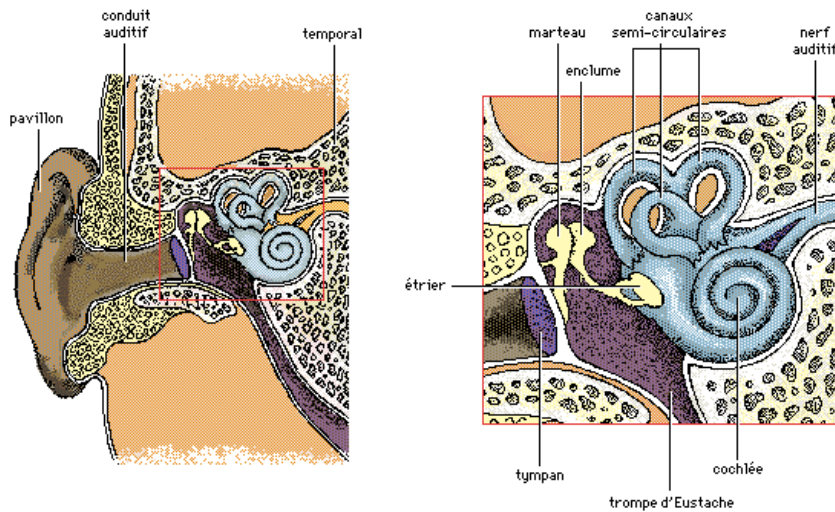


FIGURE 2.1 – L'oreille humaine

Le son stimule le tympan (fine membrane), qui se met à vibrer. Le tympan transmet son mouvement aux osselets qui le répercutent à l'oreille interne par l'intermédiaire de la fenêtre ovale. Les vibrations se propagent dans un liquide enfermé dans la cochlée. La cochlée est tapissée de minuscules cils reliés au nerf auditif.

Oreille externe (pavillon → conduit → tympan) : le pavillon recueille le signal auditif et le guide dans le conduit auditif comme le ferait un réflecteur, tout en favorisant les fréquences élevées (5 kHz). Les dimensions et les parois du conduit en font un résonateur pour les fréquences voisines de 2 kHz qui sont justement les fréquences vocales. Le tympan vibre et transmet le mouvement aux organes qui constituent l'oreille moyenne, (fonction de l'oreille moyenne :

adaptation d'impédance et protection contre les bruits trop forts). Le signal arrive alors dans l'oreille interne, milieu liquidien où la cochlée le transforme en impulsions électriques et chimiques conduites par le nerf auditif, aux zones du cerveau concernées.

## 2.2 Sensibilité de l'oreille

L'oreille transforme les pressions acoustiques en sensation auditives. Elle ne perçoit pas de la même manière toutes les fréquences. L'ensemble de courbes de la figure ci-dessous est appelée diagramme de Fletcher et Munson. Il représente les courbes d'égale sensation sonore d'une oreille humaine normale en fonction de la fréquence. La zone d'audition normale est comprise entre la limite de la douleur (vers 120 décibels) et le seuil d'audition (0dB à 1000Hz). Elle est en outre limitée vers 30 Hz pour les fréquences basses et vers 15000 Hz pour les fréquences hautes. Ce diagramme est une moyenne. Il montre que la sensibilité de d'oreille

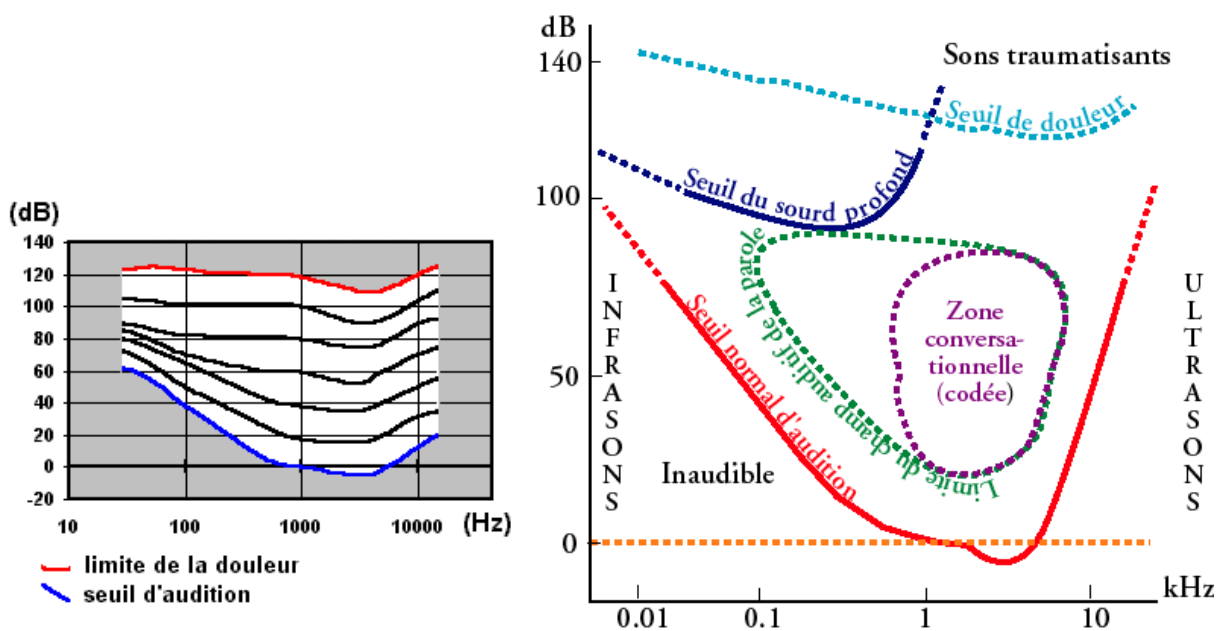


FIGURE 2.2 – Diagramme de Fletcher et Munson (à gauche). Sons audibles de 20 à 20000 Hz (à droite).

est maximale entre 1000 et 5000Hz. Les limites évoluent d'un sujet à l'autre et pour un même individu en fonction de l'âge ou des maladies et accidents. Entre 20 Hz et 15000 Hz, la sensation auditive produite par un son pur de niveau  $L_p$  varie en fonction de la fréquence. On a la même sensation pour un son de fréquence 1000 Hz à 40 dB, pour un son de fréquence 100 Hz à 65 dB et pour un son pour un son de fréquence 10000 Hz à 50 dB. Ces 3 sons ont un même niveau d'isotonie de 40 phones (unité qui sert à exprimer le niveau d'isotonie). L'échelle des phones coïncide avec l'échelle des dB SPL pour un son de 1 kHz).

## 2.3 Niveaux de pression acoustiques pondérés

Le microphone –qui sert pour les mesures physiques de pression acoustique– a, en théorie, une sensibilité constante quelle que soit la fréquence ou le niveau sonore. Lorsque l'on fait une mesure, il est important de pouvoir prendre en compte les variations de la sensibilité de l'oreille en fonction de la fréquence. Certains appareils incorporent donc des filtres (appelés pondération A, B, C ou D) qui permettent de compenser cette variabilité. Pour préciser com-

ment la mesure a été effectuée on utilise l'unité dB(A), dB(B), dB(C) ou dB(D). C'est le dB(A) qui est le plus utilisé. Les différents types de pondérations sont :

1. le filtre A (dB(A)) : fondé sur l'isophone 40 phones, l'échelle "A" est pondérée en fonction de la sensibilité moyenne de l'oreille humaine à 40 dB (maximale aux alentours de 2 kHz). Elle est utilisée pour les mesures ayant trait aux normes de protection au bruit continu ou variable, pour les mesures en acoustique architecturale, et pour les audiogrammes (courbes de sensibilité auditive d'un patient).
2. le filtre B (dB(B)) : fondé sur l'isophone 70 phones
3. le filtre C (dB(C)) : fondé sur l'isophone 100 phones (niveaux forts). L'échelle "C" est pondérée en fonction de la sensibilité de l'oreille humaine à 100 dB. La pondération est quasi inexistante entre 50 Hz et 5 kHz. L'échelle C, plus proche de l'échelle physique, est utilisée pour les mesures des bandes passantes des transducteurs : haut-parleurs et microphones, et pour des mesures de bruits impulsionnels.
4. le filtre D (dB(D)) : effets physiologiques des avions

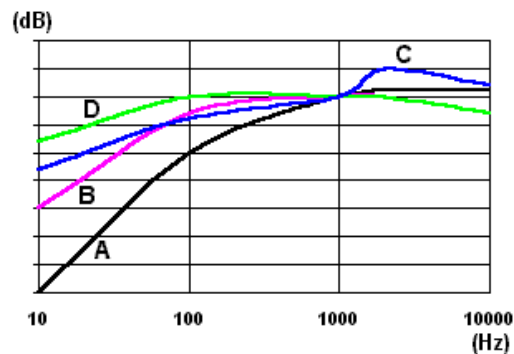


FIGURE 2.3 – Les différentes pondérations

Actuellement, sur le plan réglementaire, seule la pondération A est utilisée pour évaluer la gêne due aux bruits, quelle que soit leur intensité. L'intérêt des échelles de pondération est de pouvoir passer d'une unité physique, le décibel, à une unité physiologique, le phone. (1 phone = 1 dB à 1 kHz). Niveau global en dB(A) :

$$L_{p(A)} = 10 \log \left( \sum_i 10^{\frac{L_{p_i} + \text{Ponderation}}{10}} \right) \quad (2.1)$$

i étant l'indice de la bande d'octave ou de 1/3 d'octave (voir tableau 2.1).

## 2.4 Evaluation de la gêne : le niveau NR

On souhaite ici définir des critères de danger pour l'audition (en particulier pour les travailleurs placés à des postes bruyants). Pour cela, l'influence de la répartition spectrale de l'énergie sur la tolérance à un bruit peut être mise en évidence en faisant la comparaison des spectres de bruit avec des diagrammes types.

**Remarque :** analyse des courbes en fonction de la fréquence. Chaque courbe est repérée par le niveau correspondant à 1 kHz. Toutes ces courbes forment le réseau de courbes NR (Noise Rating) et l'indice NR pour un spectre est la côte de la courbe la plus élevée atteinte par celui-ci lorsqu'il est reporté sur le diagramme. Pour une exposition de 8 h/j et 40 h/semaine, on établit des limites de danger de traumatisme :

- pas de danger si  $NR < 75$  dB

Fréquence centrale en Hz		Pondération A	
Octave	1/3 octave	Octave	1/3 octave
63	50	-25	-30.2
	63		-26.2
	80		-22.5
125	100	-16	-19.1
	125		-16.1
	160		-13.4
250	200	-8.5	-10.9
	250		-8.6
	315		-6.6
500	400	-3	-4.8
	500		-3.3
	630		-1.9
1000	800	0	-0.8
	1000		0
	1250		0.6
2000	1600	1	1
	2000		1.2
	2500		1.3
4000	3150	1	1.2
	4000		1.1
	5000		0.5
8000	6300	-1	-0.1
	8000		-1.1
	10000		-2.5

TABLE 2.1 – Pondérations en octaves et tiers d'octave



- alerte si NR atteint 80 dB
- danger si NR atteint 85 dB

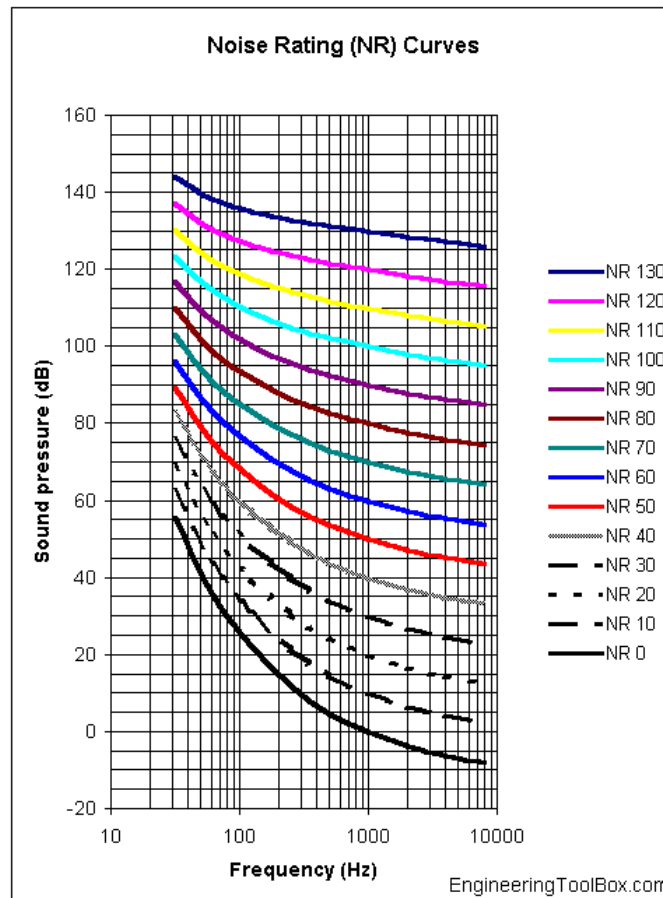


FIGURE 2.4 – Courbes de “noise rating”

## 2.5 Niveaux de bruits équivalents

L'évaluation de l'exposition à des niveaux de pressions fluctuant dans le temps nécessite l'usage d'indices globaux, construits à partir de la connaissance de la variation temporelle du niveau de bruit.

$$L_{eq} = 10 \log \left( \frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{L_p(t)}{10}} \right) \quad (2.2)$$

Le niveau acoustique équivalent d'un bruit fluctuant est le niveau acoustique dû au bruit stationnaire qui aurait la même énergie acoustique que le bruit fluctuant.

**Remarques :** le temps d'intégration doit être précisé (T peut être de quelques secondes ou plusieurs semaines). Le  $L_{eq}$  est très utilisé pour les bruits routiers et est même intégré dans les normes françaises pour le bruit de circulation de 8h à 20h. On définit aussi des niveaux acoustiques statistiques à partir du dB(A).

Exemples :

- $L_{10}$  qui est le niveau dépassé pendant 10% du temps (pointes de bruits)
- $L_{50}$  qui est le niveau dépassé pendant 50% du temps (niveaux moyens)
- $L_{90}$  qui est le niveau dépassé pendant 90% du temps (bruit de fond)



# Chapitre 3

## Acoustique des salles

### Sommaire

---

3.1	Introduction . . . . .	27
3.2	Propagation des ondes dans un local clos . . . . .	27
3.3	Absorption acoustique . . . . .	29
3.4	Niveau de pression dans un local . . . . .	30
3.5	Temps de réverbération . . . . .	31
3.6	Les matériaux absorbants . . . . .	33
3.7	Diaphragmes ou panneaux fléchissants . . . . .	34
3.8	Conclusion . . . . .	34

---

### 3.1 Introduction

Ce domaine de l'acoustique peut aussi être appelé "acoustique interne des locaux" ou "correction acoustique", partie intégrante de l'acoustique architecturale. On s'intéresse à la transformation d'un message sonore (parole ou musique) dans un volume fermé. Ce domaine de l'acoustique n'a rien à voir avec l'isolation acoustique d'un local par rapport à un autre (ou par rapport à l'extérieur) (cf. chapitre précédent).

### 3.2 Propagation des ondes dans un local clos

On s'intéresse à un local fermé de volume  $V$ , où se trouve une source  $S$  de puissance acoustique  $W$  et un récepteur  $R$ . La source  $S$  émet des ondes sphériques.

#### 3.2.1 Réflexion des ondes sonores

Lorsqu'une onde acoustique rencontre un obstacle, sa direction de propagation est modifiée : c'est la réflexion. Ce phénomène est analogue à la réflexion d'ondes lumineuses. La loi de Snell-Descartes s'applique alors (égalité des angles incidents et réfléchis), pour des surfaces planes ou faiblement convexes ou concaves. Le matériau composant la paroi est plus ou moins absorbant. L'amplitude de l'onde réfléchie est donc plus faible que celle de l'onde incidente. Ce comportement de la paroi dépend de ses propriétés mécaniques (impédance).

#### 3.2.2 Echo et réverbération

Supposons que notre source émette un signal impulsif (c'est-à-dire bref, par exemple un coup de pistolet). Etudions maintenant les informations parvenant au récepteur  $R$  situé dans

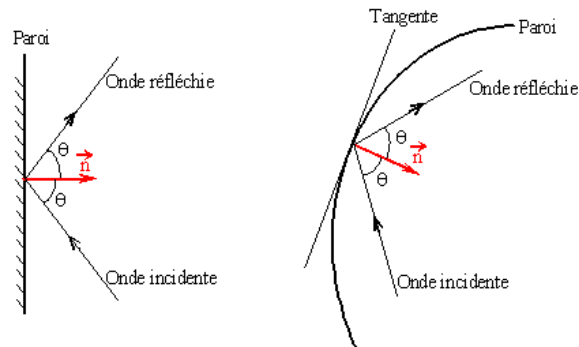


FIGURE 3.1 – Réflexion des ondes sur une paroi

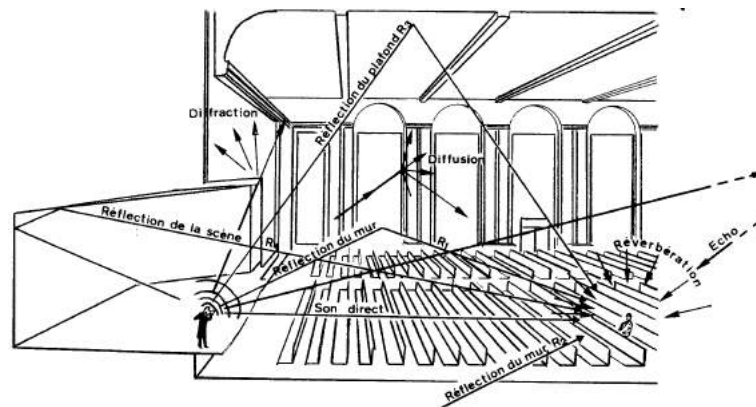


FIGURE 3.2 – Chemin de propagation du son dans une salle de concert et principaux phénomènes physiques s'y produisant

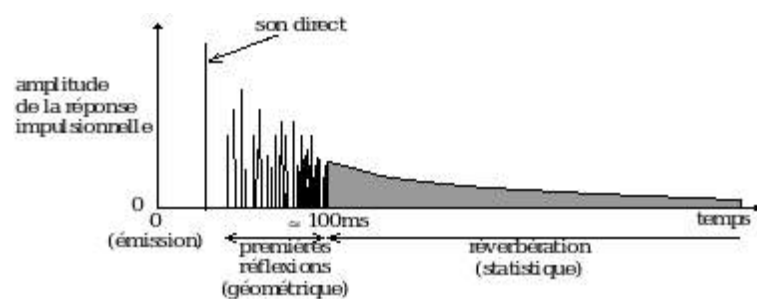


FIGURE 3.3 – Echogramme théorique illustrant les phénomènes physiques mentionnés figure 3.2

la salle (voir figures 3.2 et 3.3). Le récepteur  $R$  entendra d'abord le son direct, son provenant directement de  $S$  atténué par la distance source-récepteur  $d_{SR}$ . Ce son direct arrive au bout du temps :

$$\tau = \frac{d_{SR}}{c_0} \quad (3.1)$$

Puis il entendra les premières réflexions : les différents obstacles et parois de la salle retournent au récepteur les réflexions du son direct. Les ondes subissant des réflexions arrivent un peu plus tard que le son direct (en raison du "chemin" supplémentaire parcouru) et à chaque réflexion correspond une atténuation d'amplitude, qui vient s'ajouter à l'atténuation liée à la distance supplémentaire parcourue.

**Echo** : le temps d'intégration de l'oreille est de 30 à 40 ms pour un son complexe de niveau constant. Si un son se répète après plus de 30 ms, et avec une amplitude suffisante, on le qualifie d'écho : l'oreille a le temps de faire la distinction entre les deux sons équivalents mais décalés dans le temps. Ceci entraîne un sentiment auditif très gênant (echo sur un téléphone portable).

**Réverbération** : Au contraire, lorsque l'oreille n'a pas le temps de faire la distinction entre les réflexions successives, de bien séparer son direct et réfléchi, on parle de réverbération. La réverbération caractérise en fait une salle au niveau de la quantité d'ondes réfléchies, de leurs amplitudes, et surtout de la vitesse à laquelle décroît l'amplitude du fond sonore.

### 3.2.3 Champs acoustique réverbéré

Quand la source émet un bruit continu et entretenu, on peut séparer le champ reçu en  $R$  en un champ acoustique direct (l'onde allant directement de  $S$  à  $R$ ) et un champ réverbéré (somme de toutes les autres ondes qui se sont réfléchies une ou plusieurs fois). Lorsque les ondes réfléchies sont en très grand nombre, qu'elles proviennent de toutes les directions, et avec des intensités comparables dans toutes ces directions, on a alors sensiblement la même pression dans toute la salle : on dit que le champ est diffus.

## 3.3 Absorption acoustique

On caractérise ici la perte d'énergie des ondes au cours de la propagation. Cette absorption se fait essentiellement de 2 façons :

- soit par l'air, à cause de facteurs tels que la viscosité, les paramètres calorifiques, la relaxation moléculaire, qui entraînent une dissipation d'énergie par dégagement de chaleur
- soit, et nous nous pencherons sur ce cas, lors de la réflexion sur les parois : à la réflexion s'associe toujours une part de transmission dans le matériau. D'une onde incidente, nous obtenons 2 ondes : 1 réfléchi et 1 transmise, qui sont toutes les deux moins énergétiques que l'onde incidente (principe de conservation de l'énergie)

### 3.3.1 Facteur d'absorption acoustique d'un matériau

**Définition** : c'est le rapport de la puissance acoustique absorbée par le matériau sur la puissance incidente sur ce matériau :

$$\alpha = \frac{W_{abs}}{W_{inc}} \quad (3.2)$$

**Remarques** :

- $\alpha$  est unidimensionnel ;  $0 < \alpha < 1$
- si  $\alpha = 1$ , le matériau est parfaitement absorbant
- si  $\alpha = 0$ , le matériau est parfaitement réfléchissant (ou rigide)

### 3.3.2 Aire d'absorption équivalente d'un local

**Définition :** l'aire d'absorption équivalente caractérise le pouvoir absorbant d'un local complet (pas seulement celui d'un matériau ou d'un mur). Elle est définie par :

$$A = \sum_i \alpha_i S_i \quad (3.3)$$

où :

- $S_i$  est la  $i$ ème surface
- $\alpha_i$  est la facteur d'absorption de la  $i$ ème surface
- $A$  est l'aire d'absorption équivalente

$A$  s'exprime en  $m^2$  ( $m^2$  de surface ayant un facteur d'absorption égal à 1). Toutes les surfaces doivent être prises en compte dans le calcul (murs, plafonds, sols, personnes et objets...).

## 3.4 Niveau de pression dans un local

Le paramètre le plus important à connaître reste le niveau de pression régnant dans le local considéré compte tenu de l'influence de ce dernier.

### 3.4.1 Pression acoustique efficace réverbérée

Dans le cas d'un champ réverbéré diffus on a :

$$p_{rev}^2 = \frac{4\rho_0 c_0 W}{A} \quad (3.4)$$

où  $A$  est l'aire d'absorption équivalente, qui dépend du local étudié.

### 3.4.2 Pression acoustique efficace du champ direct

On a :

$$p_{direct}^2 = \frac{\rho_0 c_0 Q W}{4\pi r^2} \quad (3.5)$$

où  $r$  est la distance source-récepteur. La pression efficace décroît rapidement avec la distance pour le champ direct. Le facteur de directivité  $Q$  est donné dans le cas d'une source isotrope (voir figure 3.4) :

- $Q=1$  pour une source en champ libre omnidirectionnelle
- $Q=2$  pour une source en champ libre sur une paroi (rayonne dans 1/2 sphère)
- $Q=4$  pour une source en champ libre sur une arête (rayonne dans 1/4 de sphère)
- $Q=8$  pour une source en champ libre dans un coin (rayonne dans 1/8 de sphère)

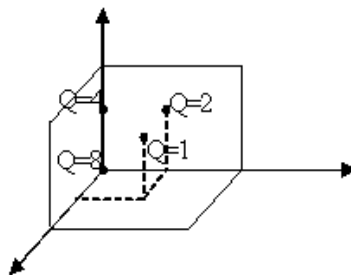


FIGURE 3.4 – Facteur de directivité en fonction de la position de la source



### 3.5.2 Formule de Sabine

La formule de Sabine donne le temps de réverbération en fonction du volume  $V$  du local et l'aire d'absorption équivalente  $A$  :

$$TR = 0.16 \frac{V}{A} \quad (3.11)$$

Nous obtenons un  $TR$  par bandes d'octave car les coefficients d'absorption des matériaux sont donnés par bandes d'octave. Limitations de la formule :

- Elle n'est valable qu'en champ diffus
- Si le local est trop réverbérant, on doit prendre en compte l'absorption de l'air

**NB :** Le temps de réverbération est parfois noté  $T$ ,  $T_R$ , ou  $RT_{60}$ .

### 3.5.3 Mesure du TR

- bruit interrompu
- enregistrement à l'analyseur du signal
- calcul de la pente (décroissance)

Il arrive que la dynamique soit inférieure à 60 dB. Dans ce cas, on calcule la pente sur 30 dB ( $RT_{30}$ ), et on interpole à 60 (multiplication du temps obtenu par 2). En général, le TR est calculé par bande d'octave. Dans tous les cas où la décroissance du niveau n'est pas linéaire, il ne peut être calculé.

Quelques exemples :

Lieu	TR
Studio	0.3 s
Salon	0.5-0.8 s
Salle de conférence	1 s
Opéra	1.5 s
Cathédrale	5-20 s

TABLE 3.1 – Quelques exemples de TR

### 3.5.4 Prévision du TR

On cherche à connaître le TR d'un local avant sa construction :

- soit on utilise la formule de Sabine, à condition de bien connaître tous les  $\alpha$  de la salle (parois, mobilier, fenêtres, personnes, ...), ce qui n'est pas toujours évident. On a souvent une estimation très grossière avec cette méthode, d'autant plus que la formule de Sabine n'est pas toujours bien vérifiée. Elle est en fait plus souvent utilisée pour calculer  $A$ .
- soit on utilise les maquettes où il faut alors tout réduire : à l'échelle 1/10ème, les distances sont divisées par 10, et les fréquences sont multipliées par 10 (on a alors des sources ultrasonores), et l'atmosphère doit être contrôlée et déshydratée pour respecter une absorption proche de la réalité. Les maquettes permettent également de détecter s'il y a un risque d'écho.
- soit on utilise l'informatique avec la méthode de lancé de rayons : la méthode consiste à envoyer des rayons acoustiques dans toute la salle et à étudier leurs réflexions. On obtient ainsi les réponses impulsionnelles de la salle pour des positions de sources et de récepteurs données.



### 3.6 Les matériaux absorbants

Nous avons vu que plus l'aire d'absorption est petite, plus le  $TR$  est élevé (cf. formule de Sabine), plus le niveau sonore résultant dans la pièce, pour une même source, est élevé. Il vaut donc mieux concevoir des pièces d'habitation dont  $A$  est grande. Généralement, le mobilier, les tapis, les revêtements muraux, suffisent à garantir une absorption adéquate, alors que dans des salles où la qualité de parole ou de musique a de l'importance, un traitement acoustique est souvent indispensable. Nous allons voir comment il est possible de réduire ou augmenter  $A$  à l'aide de matériaux acoustiques absorbants.

#### 3.6.1 Les matériaux poreux

Ils permettent une absorption en hautes fréquences. C'est par exemple de la laine de verre ou de roche, des mousses polyuréthane, des fibres végétales ou du plâtre fissuré...

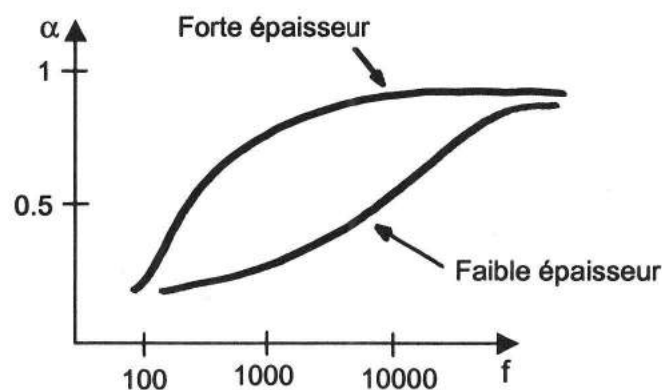


FIGURE 3.6 – Absorption des matériaux poreux

#### 3.6.2 Les résonateurs de Helmholtz

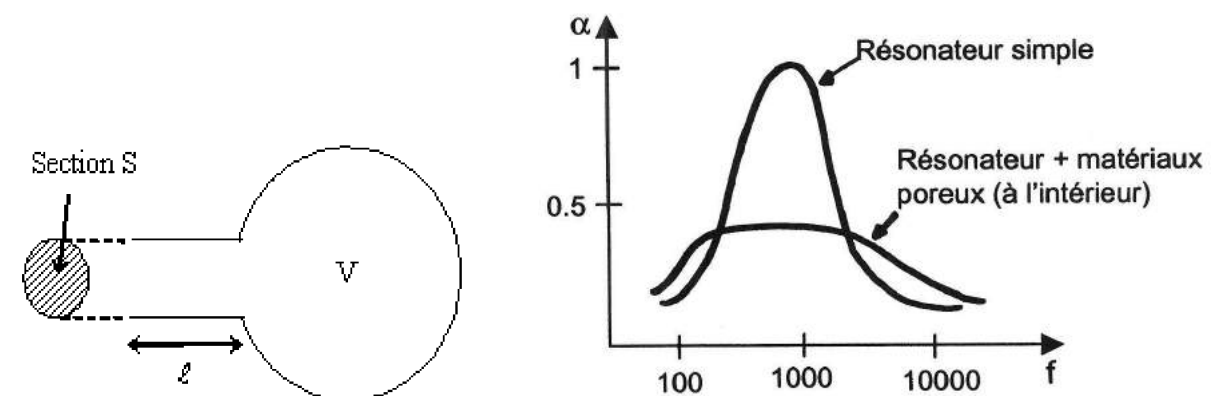


FIGURE 3.7 – Résonateurs de Helmholtz

Ce sont des résonateurs acoustiques, en ce sens qu'ils sont constitués d'une cavité reliée au milieu extérieur par un petit orifice, et que leur excitation par une onde acoustique produit un effet "piège" pour cette onde. La fréquence de résonance d'un tel système est :

$$f = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{Vl}} \quad (3.12)$$

**Exemple :** bouteille de vin :

- $l = 7$  cm
- $V = 75$  cl
- diamètre = 1.8 cm

Cela donne  $f = 119$  Hz.

### 3.7 Diaphragmes ou panneaux fléchissants

Ce sont des résonateurs mécaniques. Ils sont constitués de panneaux (ou toiles étanches) placés à quelques centimètres d'une paroi qui "emprisonne" plus ou moins d'air qui se situe sur leur face arrière. C'est l'équivalent d'un système masse-ressort, dont la fréquence de résonance est :

$$f = \frac{60}{\sqrt{md}} \quad (3.13)$$

où  $m$  est la masse surfacique du panneau et  $d$  est l'épaisseur de la couche d'air. Ce système agit principalement aux basses fréquences.

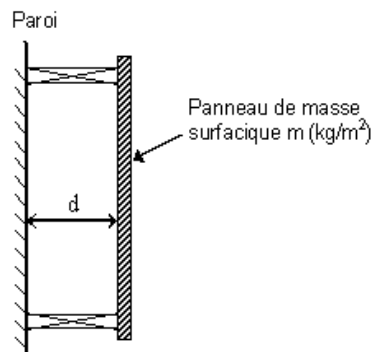


FIGURE 3.8 – Schéma de panneau fléchissant

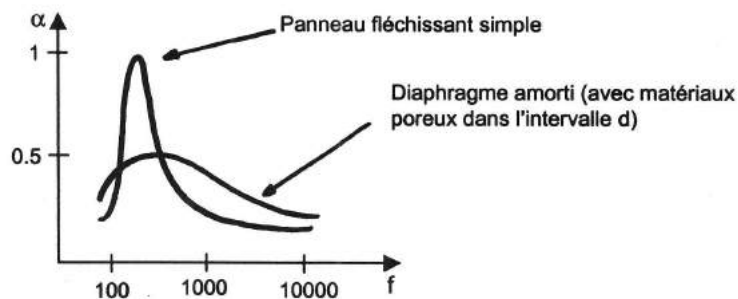


FIGURE 3.9 – Absorption de panneau fléchissant

### 3.8 Conclusion

Bien souvent, les matériaux acoustiques utilisés sont une combinaison des 2 ou 3 types d'absorbants décrits ci-dessus. Dans des cas concrets, la formule de Sabine ne permet qu'une estimation grossière du TR. En ajoutant différents matériaux absorbants, on peut atteindre le TR souhaité.

# Chapitre 4

## Isolation acoustique

### Sommaire

---

4.1	Introduction . . . . .	35
4.2	Généralités . . . . .	35
4.3	Définitions . . . . .	36
4.4	Transmission du son à travers une paroi simple . . . . .	38
4.5	Transmission du son à travers une paroi double . . . . .	39
4.6	Indice d'affaiblissement acoustique d'une paroi hétérogène . . . . .	39

---

### 4.1 Introduction

Contrairement au chapitre précédent, la source S et le récepteur R ne sont pas dans la même salle. Il est important de distinguer les notions d'absorption et d'isolation.

- Absorption : diminution de l'intensité acoustique dans une même pièce
- Isolation : diminution de l'intensité acoustique entre deux pièces

### 4.2 Généralités

#### 4.2.1 Principaux types de propagation

On distingue 2 types de bruits en acoustique du bâtiment :

1. Bruit extérieur → propagation aérienne (bruits de trafic routier)
2. Bruit intérieur → Propagation aérienne et solidienne (bruit de pas)

#### 4.2.2 Principaux types de transmission

- Transmission directe :

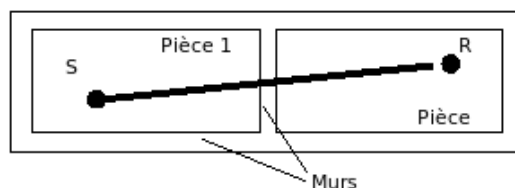


FIGURE 4.1 – Transmission directe

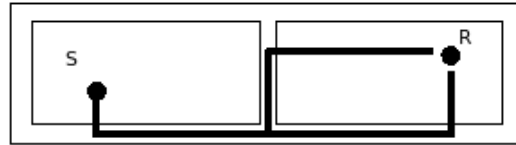


FIGURE 4.2 – Transmission indirecte

- Vibration de la paroi commune : transmission du son par l'intermédiaire de plusieurs parois.

L'objectif de l'isolation acoustique est de limiter au maximum la transmission du son. Cela se fait en jouant sur la transmission solidienne (flanking transmission), ou en diminuant le coefficient de transmission de la paroi.

### 4.3 Définitions

#### 4.3.1 Bruit aérien, bruit solidien

- **Bruit aérien** : bruit produit dans l'air et se propageant dans l'air. Sons se propageant à 340 m/s. Pour les basses fréquences, et pour des matériaux légers, ce bruit peut se convertir en bruit solidien.
- **Bruit solidien** : Bruit produit au contact d'une structure et se propageant dans cette structure. Sons se propageant beaucoup plus vite. La vibration des parois d'un local causée par le bruit solidien crée du bruit aérien.

#### 4.3.2 Isolement acoustique normalisé en dB(A)

Il est pratique, comme pour les niveaux de pression acoustique, de qualifier le degré d'isolation par une seule valeur en dB(A). Il est donc indispensable de définir des spectres de référence qui permettront des comparaisons valables. C'est pour cela qu'on a défini deux types de bruits : le bruit rose et le bruit routier.

- **Bruit rose** : il est principalement utilisé à l'intérieur des bâtiments. Le niveau de pression acoustique est le même dans chaque bande d'octave. Généralement on prend 80 dB pour chaque bande d'octave.
- **Bruit routier** : il simule les bruits émis par le trafic routier. Il sert généralement à qualifier les produits mis en œuvre pour protéger les pièces des bruits de l'espace extérieur.

Fréquence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
$L_p$ (dB)	87	86	82	81	79	73

TABLE 4.1 – Niveaux de pression du bruit routier.

#### 4.3.3 Isolement acoustique brut entre deux locaux : $D_b$

Soient deux locaux contigus : un local d'émission noté 1 et un local de réception 2. On cherche à évaluer la transmission du son à travers la paroi qui sépare les deux locaux.

- Dans 1, on suppose que le champ est diffus (même niveau de pression quelle que soit la position et la fréquence) et on a le niveau de pression  $L_1$ .
- Dans 2, on mesure le niveau de pression  $L_2$ .

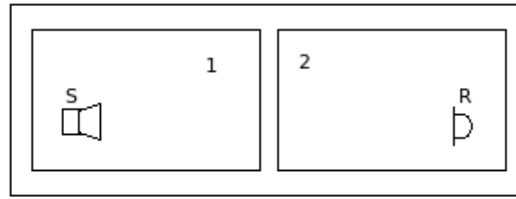


FIGURE 4.3 – Schéma du problème

On définit l'isolement acoustique brut  $D_b$  :

$$D_b = L_1 - L_2 \text{ en dB} \quad (4.1)$$

$L_1$  et  $L_2$  sont les niveaux de la pression quadratique moyenne du son dans les deux locaux. A propos de l'indice d'affaiblissement  $D_b$

- Il s'exprime en bande d'octave (ou en 1/3 d'octave)
- Il dépend des caractéristiques des deux locaux et n'est donc pas strictement représentatif de la paroi (pouvoir d'absorption des deux locaux)
- Il ne dépend pas du niveau de pression à l'émission mais varie avec la forme du spectre du bruit émis

#### 4.3.4 Isolement acoustique normalisé $D_n$

On se place dans la même configuration que précédemment. On tente de s'affranchir du pouvoir d'absorption des locaux en se rapportant au cas des locaux normalement meublés (ce qui n'est pas le cas d'un labo). L'isolement acoustique normalisé  $D_n$  est défini par :

$$D_n = L_1 - L_2 + 10 \log (2T_2) = D_b + 10 \log (2T_2) \quad (4.2)$$

où  $T_2$  est le temps de réverbération (TR) dans le local 2. Le temps de réverbération TR est le temps nécessaire pour que le niveau sonore décroisse de 60 dB lorsque l'on coupe la source acoustique. Cela revient à s'imposer un TR normalisé à 0.5 s (quand TR=0.5 s,  $D_b=D_n$ ). Une autre définition de  $D_n$  fait intervenir l'aire d'absorption équivalente :

$$D_n = L_1 - L_2 + 10 \log \left( \frac{10}{A_2} \right) = D_b + 10 \log \left( \frac{10}{A_2} \right) \quad (4.3)$$

où  $A_2$  est l'aire d'absorption équivalente dans le local 2 (l'aire d'absorption équivalente sera étudiée dans le chapitre suivant). Ici, on impose une aire d'absorption normalisée  $A_0 = 10m^2$ .

**Remarques :**

- $D_n$  est plus pertinent en bande d'octave, car le TR et  $A_2$  dépendent de la fréquence
- $D_n$  et  $D_b$  prennent en compte toutes les voies de transmission (directes + indirectes)

#### 4.3.5 Indice d'affaiblissement acoustique R

Dans ce cas, on ne tient compte que de la transmission directe, c'est à dire uniquement le bruit absorbé puis rayonné par la paroi séparatrice. L'indice d'affaiblissement acoustique est défini par :

$$R = 10 \log \left( \frac{1}{\tau} \right) \text{ et } \tau = \frac{W_2}{W_1} \quad (4.4)$$

où :

- $\tau$  est défini comme étant le facteur de transmission
- $W_1$  est la puissance émise dans le local 1

- $W_2$  est la puissance rayonnée dans le local 2

**Remarques :**

- $\tau$  est indépendant du sens de transmission
- $R$  s'exprime soit par bande d'octave, soit de manière globale. Sa valeur varie avec la fréquence et dépend des caractéristiques de la paroi (sa masse surfacique, sa rigidité de flexion et son amortissement)
- S'il n'y a aucune transmission indirecte :

$$D_b = R + 10 \log \left( \frac{A_2}{S} \right) \text{ ou } S \text{ est la surface de la paroi séparatrice} \quad (4.5)$$

### 4.3.6 Comparaison entre $R$ et $D_n$

La différence dépend du type de transmission (uniquement directe ou directe + indirecte) entre les deux locaux.

$$D_n = R + 10 \log \left( \frac{V_2}{S} \right) + 10 \log \left( \frac{0.16}{T_0} \right) - a \text{ et } a = 5 + \frac{S_r}{10} - N \quad (4.6)$$

avec :

- $V_2$  : volume de la pièce de réception
- $S$  : surface de la paroi de séparation commune aux 2 locaux
- $S_r$  : surface des cloisons de maçonneries légères et rigide + doublages thermiques
- $N$  : nombre de cloisons avec un doublage à base de laine minérale et parement

### 4.3.7 Niveau de bruit de choc normalisé

Le test s'effectue avec une machine à chocs normalisée (5 marteaux métalliques qui frappent périodiquement le sol). On mesure le niveau de pression  $L_2$  dans le local 2 (où le  $TR=T_2$ ). On a :

$$L_n = L_2 - 10 \log (2T_2) \quad (4.7)$$

ou

$$L_n = L_2 - 10 \log \left( \frac{10}{A_2} \right) \quad (4.8)$$

## 4.4 Transmission du son à travers une paroi simple

### 4.4.1 Loi de masse

Le niveau sonore rayonné est d'autant plus faible que la paroi est lourde. La loi de masse expérimentale pour le niveau global en dB(A) s'écrit :

$$\begin{aligned} R &= 40 \log (m) - 46 \text{ dB(A) si } m > 150 \text{ kg.m}^{-3} \\ R &= 17 \log (m) - 4 \text{ dB(A) si } m < 150 \text{ kg.m}^{-3} \end{aligned} \quad (4.9)$$

### 4.4.2 Loi de fréquences

Le niveau sonore rayonné est d'autant plus faible que la fréquence est élevée.

$$R_0 = 10 \log (m_s f) - 43 \text{ dB} \quad (4.10)$$

où :

- $m_s$  est la masse surfacique de la paroi
- $f$  est la fréquence de l'onde incidente

Quand on double  $f$  on augmente l'isolement de 6 dB ; quand on double  $m_s$ , on augmente l'isolement de 6 dB. Une paroi simple isole donc mieux les fréquences aiguës que les fréquences graves.

## 4.5 Transmission du son à travers une paroi double

Système équivalent à un système masse-ressort-masse. Si  $m_1$  et  $m_2$  sont les masses surfaciques des parois, et pour un bon isolement ( $R$  grand), la fréquence de résonance de ce système est :

$$f_r = 84 \sqrt{\frac{1}{d} \left( \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad (4.11)$$

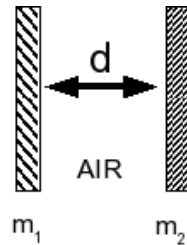


FIGURE 4.4 – Schéma d'une double paroi

**Remarque :** en comparant le  $R$  d'une paroi double avec celui d'une paroi simple constituée de l'un des matériaux de la paroi double, on voit que l'on peut obtenir des isollements très bons avec des masses relativement faibles. Il faut néanmoins que la fréquence de résonance du système soit alors très basse, voire dans le domaine non audible.

## 4.6 Indice d'affaiblissement acoustique d'une paroi hétérogène

Une paroi hétérogène est une paroi composée de plusieurs éléments simples (portes, cloisons, fenêtres...). On cherche à calculer l'indice d'affaiblissement  $R$  équivalent, à partir des caractéristiques de chaque élément.

**Définition :** le facteur de transmission d'une paroi hétérogène, ramené à la surface totale  $S$  de cette paroi est égal à la somme des facteurs de transmission de chacun des  $n$  éléments, pondérés par leurs surfaces respectives.

$$\tau S_{tot} = \sum_{i=1}^n \tau_i S_i \text{ d'où } \tau = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i S_i}{S_{tot}} \quad (4.12)$$

**Exemple :** cas d'une cloison et d'une porte : On a  $S_{tot} = S_1 + S_2$  ; alors :

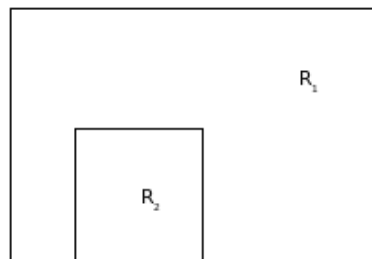


FIGURE 4.5 – Schéma du problème

$$\tau S_{tot} = \tau_1 S_1 + \tau_2 S_2 \quad (4.13)$$

d'où

$$R = 10 \log \left( \frac{S_{tot}}{\tau_1 S_1 + \tau_2 S_2} \right) \quad (4.14)$$

Si  $R_1$  et  $R_2$  sont les indices d'affaiblissement des parois 1 et 2 alors :

$$R = 10 \log \left( \frac{S_{tot}}{S_1 10^{-\frac{R_1}{10}} + S_2 10^{-\frac{R_2}{10}}} \right) \quad (4.15)$$



# Chapitre 5

## Mécanique ondulatoire

### Sommaire

5.1	Systèmes vibratoires élémentaires . . . . .	41
5.2	Oscillations libres . . . . .	42
5.3	Oscillations forcées . . . . .	43
5.4	Impédance mécanique . . . . .	44
5.5	Oscillateurs couplés . . . . .	45

### 5.1 Systèmes vibratoires élémentaires

#### 5.1.1 Système masse-ressort

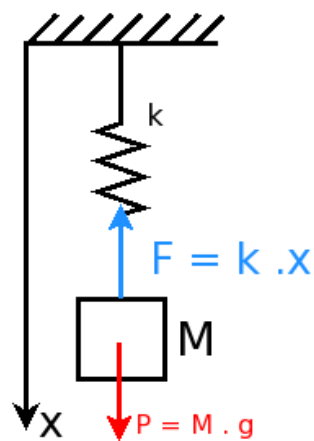


FIGURE 5.1 – Système masse-ressort

Dans un microphone comme dans un haut-parleur, la membrane est déviée de sa position d'équilibre par l'onde sonore dans le cas d'un microphone, et par la force de Laplace dans le cas d'un haut-parleur. Ensuite, elle oscille par rapport à sa position d'équilibre. On peut assimiler un transducteur à un système masse-ressort qui est l'archétype du système oscillant : il est composé d'une masse suspendue à un ressort. Si on écarte la masse de sa position d'équilibre, elle se met ensuite à osciller.

Dans le cas d'un transducteur, la masse est celle de l'ensemble des pièces mobiles (pour un transducteur électrodynamique, il s'agit de la membrane et de la bobine). Cette masse mobile est reliée à une suspension mécanique qui possède une certaine élasticité, dont le rôle est de ramener la membrane à sa position d'équilibre.

La masse  $m$  se mesure en kg. Le ressort est caractérisé par une grandeur que l'on appelle raideur, et que l'on note  $k$ .  $k$  se mesure en newtons par mètre (N/m). Si la masse  $m$  est déplacée d'une distance  $x$  par rapport à sa position d'équilibre, le ressort exerce sur la masse une force de rappel :

$$f = -kx \tag{5.1}$$

Le signe moins signifie que la force est dans le sens contraire au déplacement.

#### 5.1.2 Résonateurs de Helmholtz

En acoustique on utilise souvent des cavités vibrant sous l'action des ondes sonores : il peut s'agir du tube arrière d'un microphone, du volume interne d'une enceinte, de la cavité d'un instrument de musique ... L'archétype d'un système vibratoire acoustique est un vase constitué d'un goulot et d'une cavité : on l'appelle résonateur de Helmholtz. C'est l'analogie, au plan acoustique, du système mécanique représenté par le système masse-ressort.

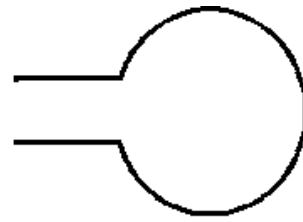


FIGURE 5.2 – Résonateur de Helmholtz

Pour les fréquences suffisamment basses (si la longueur d'onde est grande devant les dimensions du résonateur), on peut alors montrer qu'une cavité joue un rôle analogue à celui du ressort dans un système masse-ressort. Il suffit d'imaginer un ballon en plastique : si on le comprime, il a tendance à revenir à sa position d'équilibre ; inversement, si on étire sa surface, il a tendance à se rétracter. Quant à la masse d'air comprise dans le goulot, elle se comporte comme une masse vibrante : toutes les molécules comprises dans le goulot vibrent en phase.

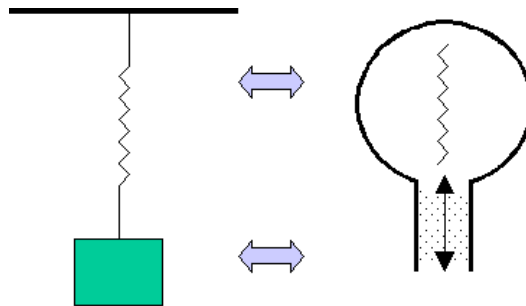


FIGURE 5.3 – Le résonateur de Helmholtz est l'équivalent acoustique du système masse-ressort

## 5.2 Oscillations libres

### 5.2.1 Vibration mécanique

Soit un système masse-ressort. Supposons qu'on écarte la masse de sa position d'équilibre, puis qu'on la relâche. La masse oscille : on observe des "oscillations libres". Ces oscillations se produisent sur une fréquence particulière, qu'on appelle la fréquence propre du système oscillant. La fréquence propre ne dépend que de la masse  $m$  de l'oscillateur (en kg) et de la raideur  $k$  du ressort (en N/m). Elle ne dépend pas de la distance à laquelle on écarte la masse de sa position d'équilibre. On peut montrer que la fréquence propre d'un système masse-ressort vaut (en Hz) :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5.2)$$

### 5.2.2 Vibration acoustique

**Fréquence propre :** considérons un résonateur de Helmholtz dont les caractéristiques sont :

- $S$  la surface du goulot
- $l$  la longueur du goulot
- $V$  le volume de la cavité

On définit également une constante appelée constante thermodynamique, et qu'on note  $\gamma$ . Cette constante vaut :  $\gamma=1,4$ . On admettra qu'en basses fréquences, une cavité est analogue

à une raideur, qu'on appelle raideur apparente de la cavité, dont la valeur est :

$$K = \frac{\gamma p_0 S^2}{V} \quad (5.3)$$

La masse vibrante est la masse d'air comprise dans le goulot est :

$$m = \rho_0 l S \quad (5.4)$$

On peut donc écrire :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\gamma p_0 S}{\rho_0 l S}} \quad (5.5)$$

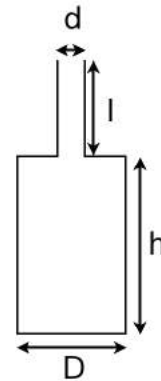
Si le volume de la cavité augmente, sa raideur apparente diminue donc, ce qui signifie que le volume d'air compris dans la cavité se comprime plus facilement. A l'inverse, si la cavité est plus petite, l'air compris à l'intérieur se comprime plus difficilement ; la cavité possède donc une forte raideur apparente.

**Exemple d'une bouteille :** considérons une petite bouteille dont les dimensions sont les suivantes :

- Longueur du goulot :  $l = 2$  cm
- Diamètre du goulot :  $d = 1.5$  cm
- Diamètre de la bouteille :  $D = 4$  cm
- Hauteur de la bouteille :  $h = 6$  cm

La surface du goulot est :

$$S = \pi \frac{d^2}{4} = 1.8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (5.6)$$



Rappelons que le volume d'un cylindre de rayon  $R$  et de hauteur  $h$  est :  $V = \pi R^2 h$ . Le volume interne de la bouteille vaut donc :  $V = 75.4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ . La fréquence propre est alors :  $f = 576.6$  Hz. C'est la fréquence de la note que l'on entend lorsqu'on souffle sur le goulot de façon à faire vibrer l'air.

**Remarque :** effet du frottement : la fréquence propre est définie comme la fréquence de vibration des oscillations libres non amorties, c'est-à-dire que l'on néglige le frottement du système. Or, dans la réalité, le système vibratoire comporte toujours du frottement (il peut s'agir des frottements internes dans le ressort, ou du frottement de l'air contre les parois du résonateur). Pour traduire ce phénomène, on définit un coefficient appelé coefficient de frottement, que l'on note  $f'$ , exprimé en Ns/m. Si  $v$  est la vitesse vibratoire de la membrane, le frottement peut se modéliser par une force de frottement (en N) qui vaut :

$$F_f = -f'v \quad (5.7)$$

## 5.3 Oscillations forcées

### 5.3.1 Définition

On dit que l'oscillateur subit des oscillations forcées lorsqu'il est soumis à une force extérieure. Dans le cas d'un système masse-ressort, il peut s'agir, par exemple, de la force exercée par une main qui agite le ressort. Dans le cas d'un microphone, la force excitatrice est celle du son qui fait vibrer la membrane. Dans le cas du haut-parleur, c'est la force de Laplace produite par le courant électrique.

### 5.3.2 Résonance

Supposons qu'on excite l'oscillateur par une force sinusoïdale dont la fréquence est variable. Si on fait varier la fréquence d'excitation, on s'aperçoit que l'amplitude vibratoire est maximale lorsque la fréquence d'excitation est égale à la fréquence propre de l'oscillateur : c'est le phénomène de résonance. Lorsque le frottement est élevé, le maximum vibratoire est obtenu par une fréquence de résonance légèrement inférieure à la fréquence propre.

### 5.3.3 Facteur de qualité

On définit le facteur de qualité (encore appelé coefficient de surtension) de la résonance, la quantité  $Q = \frac{m\omega_0}{\gamma}$ , où  $\omega_0$  est la pulsation propre du système définie par  $\omega_0 = 2\pi f_0$  (avec  $f_0$  la fréquence propre).  $Q$  est un nombre sans dimension. Malgré son nom, le facteur de qualité n'a rien à voir avec la qualité sonore d'un transducteur. Il mesure seulement l'"acuité" de la résonance. Un facteur de qualité élevé traduit une résonance aiguë, tandis qu'un faible facteur de qualité traduit une résonance très "amortie".

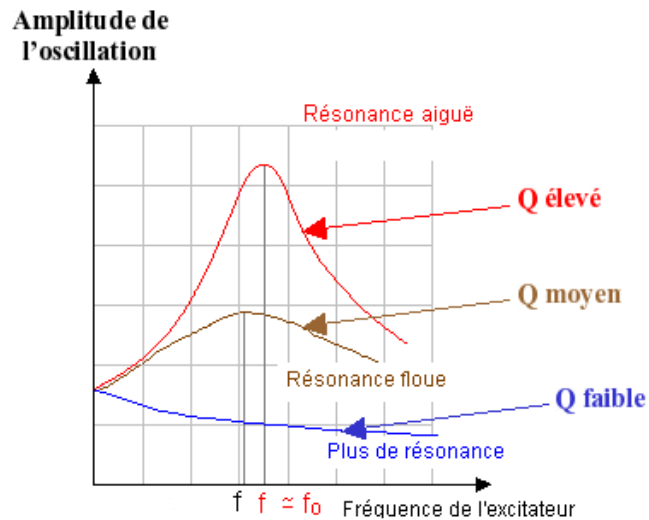


FIGURE 5.4 – Illustration du facteur de qualité  $Q$

## 5.4 Impédance mécanique

Considérons un transducteur. Appelons  $F$  la force à laquelle est soumise la membrane, et  $v$  sa vitesse vibratoire. On définit l'impédance mécanique, par :

$$Z_m = \frac{F}{v} \quad (5.8)$$

L'impédance mécanique se mesure en  $\text{Ns/m}$ . On peut dire qu'elle représente la "résistance" à la vibration (la notion est analogue à celle de l'impédance électrique, définie comme  $Z = U/I$  où  $U$  est la tension et  $I$  le courant). Si l'oscillateur possède une forte impédance mécanique, cela signifie qu'il vibre difficilement : pour une force donnée, la vitesse est très faible. Inversement, si l'impédance est faible, cela signifie que pour une force donnée, la vitesse vibratoire est grande.

### 5.4.1 Vitesse vibratoire

On appelle vitesse vibratoire ou vitesse particulière la vitesse d'une particule située sur le trajet de l'onde (qu'il ne faut pas confondre avec la célérité de l'onde, qui est la vitesse de propagation des fronts d'onde). La vitesse particulière peut être de l'ordre de quelques millimètre par seconde, même pour une fréquence de 1000 Hz. Cette vitesse est assez faible de sorte que l'on peut se demander comment il est possible de vibrer lentement, en faisant 1000 allers-retours par secondes ! En fait, l'amplitude vibratoire est aussi très faible ; aussi pendant 1 seconde, la particule effectue beaucoup d'allers-retours autour de sa position d'équilibre. Si on en revient à l'analogie d'une pierre jetée sur l'eau, la vitesse particulière correspond à la vitesse

d'oscillation d'un bouchon, tandis que la célérité correspond à la vitesse de propagation des rides circulaires.

### 5.4.2 Formule d'impédance

L'impédance dépend des caractéristiques de l'oscillateur, notamment sa masse  $m$  (en kg), et la raideur  $k$  du ressort (en N/m), ainsi que la fréquence vibratoire  $f$  (en Hz). Appelons  $f'$  le coefficient de frottement de l'oscillateur (en Ns/m) et  $\omega$  la pulsation. On admettra que l'impédance est un nombre complexe qui peut s'exprimer sous la forme :

$$Z_m = f' + j \left( m\omega - \frac{k}{\omega} \right) \quad (5.9)$$

où  $j$  est le nombre complexe imaginaire tel que  $j^2 = -1$ .

A la résonance, la valeur de l'impédance est minimale. Cela signifie que si on applique une force  $F$  d'amplitude donnée mais de fréquence  $f$  variable, la vitesse  $v$  de l'oscillateur est maximale lorsque la fréquence  $f$  est égale à la fréquence propre de l'oscillateur. Or, seule la partie imaginaire dépend de la fréquence. Autrement dit, on a :

$$m\omega_0 - \frac{k}{\omega_0} = 0 \quad (5.10)$$

Ce qui donne :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5.11)$$

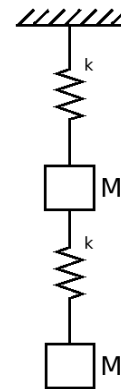
## 5.5 Oscillateurs couplés

### 5.5.1 Définition

On appelle oscillateurs couplés un système comportant plusieurs masses et plusieurs ressorts reliés entre eux. Dans ce cas, les oscillateurs agissent les uns sur les autres, et chaque oscillateur exerce une force qui influence le mouvement des autres : on dit qu'il y a couplage.

### 5.5.2 Exemple

Dans un microphone ou un haut-parleur, il y a des cavités derrière la membrane. La membrane est un système masse-ressort mécanique, et la cavité arrière est un résonateur de Helmholtz : il y a donc couplage entre un oscillateur mécanique et un oscillateur acoustique.



### 5.5.3 Modes de vibration

Lorsqu'on dispose de plusieurs oscillateurs reliés entre eux, on a plus une seule, mais plusieurs fréquences propres. Par exemple, un système de deux oscillateurs peut librement osciller de deux manières différentes (et de deux seulement). Dans le premier mode, tous les oscillateurs sont en phase, ils ont le même mouvement au cours du temps. Dans le deuxième mode, les deux oscillateurs ont des mouvements en opposition de phase. Chaque mode de vibration correspond à une fréquence propre. Il y a donc deux fréquences propres, et non plus une seule

comme pour un seul oscillateur. Pour les fréquences qui ne sont pas égales à des fréquences propres, le système vibre en combinant les deux modes.

On peut généraliser ce qui précède. Un système composé de trois ressorts et de trois masses présenterait trois modes de vibration : soit les oscillateurs sont tous en phase, soit deux oscillateurs voisins sont en phase mais en opposition avec le troisième, soit chaque oscillateur est en opposition de phase avec son voisin. Plus généralement, un système de  $N$  oscillateurs couplés possède  $N$  fréquences propres. Dans un milieu continu (une corde, ou une plaque), comme il y a une infinité de points susceptibles de vibrer, il y a une infinité de modes propres. Plus la fréquence augmente, plus le nombre de nœuds et de ventres est élevé. Toutefois, en pratique, seuls les modes de basse fréquence possèdent suffisamment d'énergie pour être observables.

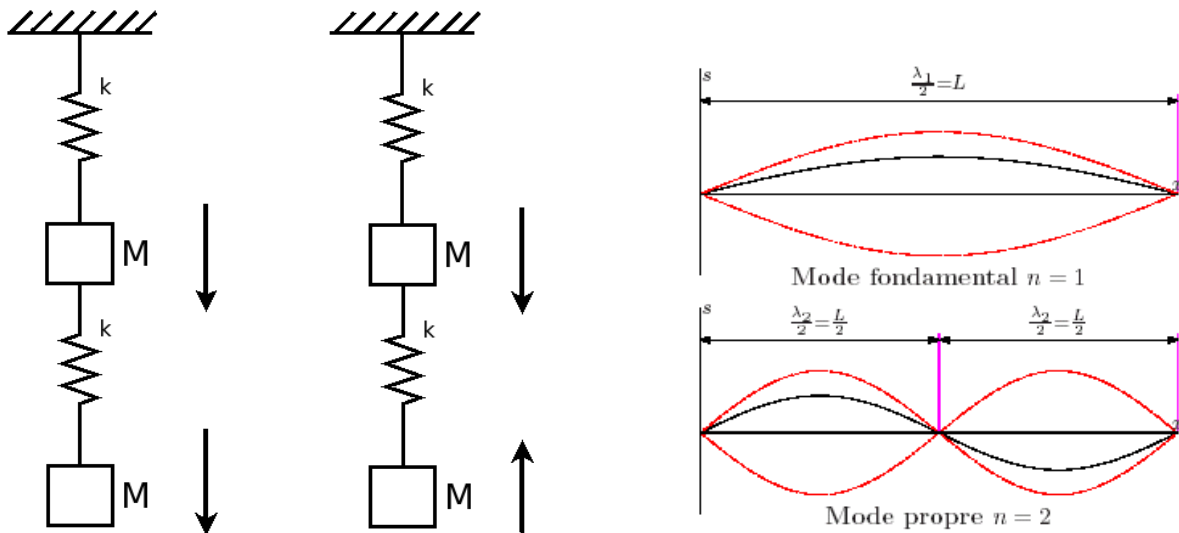


FIGURE 5.5 – Oscillateurs couplés et modes de résonance

# Chapitre 6

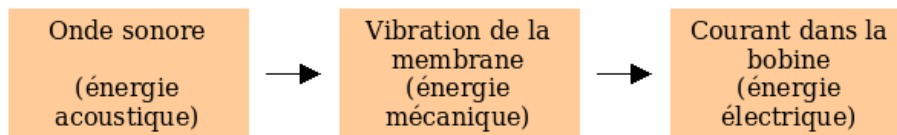
## Microphones et haut-parleurs

### Sommaire

6.1	Introduction . . . . .	47
6.2	Transduction électrodynamique . . . . .	47
6.3	Transduction électrostatique . . . . .	50
6.4	Caractéristiques des microphones . . . . .	52

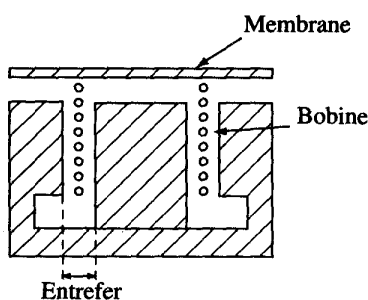
### 6.1 Introduction

Un transducteur électroacoustique transforme, soit de l'énergie acoustique en énergie électrique, soit de l'énergie électrique en énergie acoustique. Il s'agit d'un microphone dans le premier cas, et d'un haut-parleur dans le second cas. Dans un microphone, l'onde sonore (énergie acoustique) fait vibrer la membrane (énergie mécanique), ce qui produit un courant électrique :



Dans un haut-parleur, l'énergie électrique est fournie par l'amplificateur. Cette énergie fait vibrer la membrane du haut-parleur, qui transmet ainsi de l'énergie acoustique à l'air environnant. Il existe deux types principaux de transducteurs : les transducteurs électrodynamiques et les transducteurs électrostatiques.

### 6.2 Transduction électrodynamique



Le principe est le suivant, tant pour le microphone que pour le haut parleur. Une membrane de surface  $S$  (en  $m^2$ ) est reliée à une bobine, c'est-à-dire un enroulement de fil conducteur. Appelons  $l$  la longueur de la bobine déroulée (elle est généralement de l'ordre de quelques mètres). La masse mobile (qu'on notera  $m$ ) est constituée par la membrane et la bobine (elle est de l'ordre de quelques milligrammes pour un microphone et d'une dizaine de grammes pour un haut parleur). Le dispositif comporte un aimant cylindrique, qui crée un champ magnétique. On note  $B$  ce champ, qui se mesure en tesla ( $T$ ) (sa valeur est généralement de l'ordre de 0.1 à 1 tesla). La bobine

coulisser dans un espace où règne le champ magnétique, et qu'on appelle l'entrefer. Bien que le schéma de base soit le même pour les microphones et les haut-parleurs, les mécanismes mis en jeu dépendent du type de transducteur.

### 6.2.1 Microphone

**Principe :** Une onde sonore produit une pression  $p$  (en Pa) sur la membrane. Celle-ci se met alors à vibrer. La membrane est soumise à une force  $F$  (en newtons). Rappelons qu'on a, par définition :

$$p = \frac{F}{S} \quad (6.1)$$

La force  $F$  vaut donc :  $F = pS$

**Tension induite :** On peut montrer que la tension induite  $e$  (en Volts) dans la bobine est égale à :

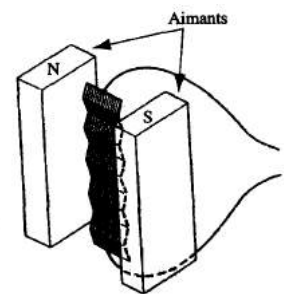
$$e = Blv \quad (6.2)$$

où  $v$  est la vitesse vibratoire de la bobine. Si on appelle  $R$  la résistance électrique de la bobine (en ohms), la bobine est donc parcourue par un courant  $i$  (mesuré en ampères) :

$$i = \frac{e}{R} \quad (6.3)$$

**Loi de Lenz :** La "loi de Lenz" peut s'énoncer comme suit : "Un changement d'état (A) dans un système physique provoque un phénomène (B) dont les effets tendent à s'opposer à ce changement." Dans le cas d'un microphone, le changement d'état (A) est la vibration de la membrane. Cette vibration produit une tension induite (B). Or, comme nous le verrons un peu plus loin, le passage d'un courant dans un condensateur placé dans un champ magnétique produit une force (appelée force de Laplace). Dans un microphone, cette force tend à s'opposer au mouvement de la membrane.

**Remarque :** Le microphone à ruban est un cas particulier de microphone électrodynamique (c'est le cas du Beyer M160 par exemple). Un ruban métallique est placé dans un champ magnétique (voir figure). Dans ce cas, il n'y a pas de bobine ; c'est le ruban qui joue à la fois le rôle de la membrane (puisqu'il reçoit la pression sonore) et de bobine (en tant que conducteur placé dans un champ magnétique). Ainsi, le courant électrique est directement produit sur le ruban.



### 6.2.2 Haut-parleur

**Loi de Laplace :** La bobine reçoit un courant électrique. Le principe du haut-parleur est fondé sur la loi de Laplace : une bobine placée dans un champ magnétique  $B$ , et parcourue par un courant électrique  $i$  est soumise à une force mécanique  $F$ , appelée force de Laplace. Si on appelle  $l$  la longueur de la bobine, la force de Laplace vaut :

$$F = Bli \quad (6.4)$$

La force de Laplace est dirigée verticalement. Comme le courant est variable –puisqu'il reproduit les variations du signal enregistré– la force de Laplace est également variable au cours du temps. Le mouvement de la membrane reproduit ainsi les oscillations du courant électrique.



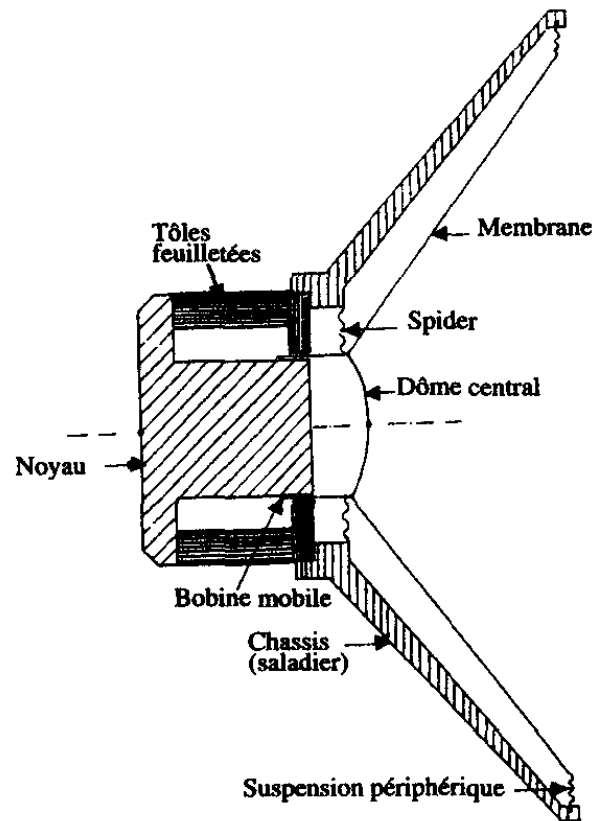
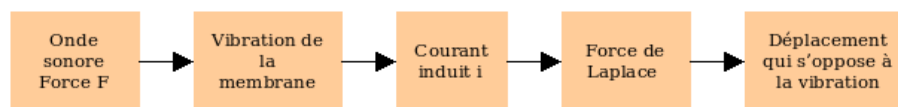


FIGURE 6.1 – Exemple de haut-parleur en coupe

### 6.2.3 Couplage électroacoustique

Considérons un microphone. L'onde sonore produit une force  $F$  sur sa membrane ; cette vibration induit alors un courant  $i$  dans la bobine. On se retrouve ainsi dans la situation analogue à celle du haut-parleur, c'est-à-dire une bobine placée dans un champ magnétique, et parcourue par un courant. Il s'ensuit une force de Laplace  $F'$ . Or il se trouve que cette force tend à s'opposer au déplacement provoqué par l'onde sonore : c'est le phénomène de couplage électroacoustique. Heureusement, la force de Laplace à laquelle est soumise la bobine ( $F'$ ) est plus faible que celle produite par l'onde sonore  $F$ , si bien que le microphone peut fonctionner. Un phénomène réciproque se produit avec un haut-parleur. La bobine est parcourue par un



courant . Elle est alors soumise à une force de Laplace  $F$ . On se retrouve alors dans le cas du microphone (membrane soumise à une force). Il s'ensuit un courant induit . Or il se trouve que celui-ci s'oppose au courant délivré par l'amplificateur. Là encore, le courant induit est plus faible, ce qui permet au haut-parleur de fonctionner. Ces phénomènes de rétroaction (le microphone peut aussi se comporter comme un haut-parleur et vice-versa) sont importants, car ils permettent d'expliquer les courbes d'impédance des microphones et des haut-parleurs.

### 6.2.4 Résumé

On distingue les microphones électrodynamiques à bobine mobile et à ruban. Dans le premier cas, la membrane mise en vibration par les ondes acoustiques est liée à une bobine placée

dans un champ magnétique. Le déplacement de la bobine dans ce champ magnétique induit une tension électrique. Dans le second cas la membrane est en fait un ruban très fin en aluminium placé dans un champ magnétique. Son mouvement induit de la même façon que précédemment une tension électrique.

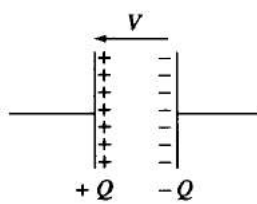
	A bobine	A ruban
<b>Intérêt</b>	Solide, bon marché	Léger, bonne dynamique
<b>Inconvénient</b>	Lourd, moins bonne réponse dynamique	Fragile, plus cher

**Le microphone électrodynamique** est un transducteur électroacoustique fonctionnant sur le principe suivant : la vibration sonore met en mouvement une membrane très fine reliée à une bobine plongée dans un champ magnétique constant. Le mouvement de la bobine dans le champ induit une f.e.m. à ses bornes (de l'ordre du mV), qui est l'image fidèle du signal sonore reçu. Il ne reste plus qu'à préamplifier le signal électrique produit par le micro pour pouvoir l'utiliser. Son intérêt réside dans la fidélité du signal produit (utilisation en prise de son).

### 6.3 Transduction électrostatique

Les transducteurs électrostatiques fonctionnent sur le principe du condensateur.

#### 6.3.1 Principe du condensateur



On appelle condensateur un ensemble de deux plaques métalliques voisines, chargées électriquement et séparées par un isolant (l'air par exemple). Ces plaques sont appelées armatures, ou encore électrodes. Elles portent une charge électrique de même valeur, mais de signe opposé (+Q et -Q). Appelons :

- $S$  la surface des armatures (elle est généralement de l'ordre de 0.3 à 0.5 cm<sup>2</sup>).
- $d$  la distance entre les électrodes (elle est de l'ordre de quelques dizaines de microns).
- $V$  la tension de polarisation. C'est la tension électrique  $V$  appliquée aux bornes du condensateur. C'est elle qui est responsable de l'apparition des charges +Q et -Q.

On définit la capacité du condensateur par :

$$C = \frac{Q}{V} \quad (6.5)$$

La capacité s'exprime en farads (F). Comme il s'agit d'une unité très grande, on utilise plus souvent le microfarad ( $\mu F$ ), le nanofarad (nF) ou le picofarad (pF).

Pour caractériser l'isolant entre les deux électrodes, on définit une grandeur, appelée permittivité électrique, notée  $\epsilon$ . Elle s'exprime en  $F \cdot m^{-1}$  et caractérise la réponse de l'isolant à un champ électrique donné. Sa valeur dans l'air est quasiment la même que dans le vide :

$$\epsilon_{air} \approx \epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} \text{ F/m} \quad (6.6)$$

On peut montrer que la capacité du condensateur s'exprime en fonction de la distance inter électrodes, grâce à la relation :

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d} \quad (6.7)$$

### 6.3.2 Application à la transduction

**Microphone électrostatique :** La membrane métallique est positionnée face à une plaque fixe. Cette plaque, ainsi que la membrane, sont chargées électriquement par une tension de polarisation  $V_0$ . De la sorte, l'ensemble forme un condensateur, dont la membrane est l'armature mobile et la plaque l'armature fixe (encore appelée contre électrode). En combinant les relations  $C = \frac{Q}{V}$  et  $C = \frac{\epsilon_0 S}{d}$ , on peut exprimer la tension aux bornes des armatures par :

$$V = \frac{Qd}{\epsilon_0 S} \quad (6.8)$$

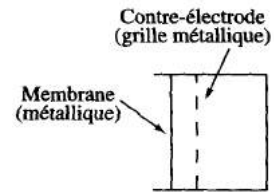


Fig. VI.6. Principe du microphone électrostatique.

Lorsque la membrane se déplace sous l'action de l'onde sonore, cela modifie la distance inter électrodes. La tension  $V$  aux bornes du condensateur varie donc également (la charge  $Q$  ne change pas), ce qui produit une variation du courant électrique dans la bobine (en fait, le microphone mesure la variation de tension par rapport à la tension de polarisation  $V_0$ , puisque celle-ci existe, même en l'absence d'onde sonore sur la membrane). La tension de polarisation est générée par une source de tension auxiliaire continue ( $V_0 = 12$  à  $48$  V pour les microphones de prise de son et  $V_0 = 100$  à  $200$  V pour les microphones de mesure).

**Microphone à électret :** Le principe d'un microphone à électret est identique à celui d'un microphone électrostatique. La différence, c'est que la tension de polarisation n'est pas fournie par une tension électrique extérieure, mais par un matériau diélectrique. Un tel matériau conserve en permanence une différence de tension électrique entre ses deux faces : c'est ce qui permet l'existence d'une charge électrique entre les deux armatures. Plusieurs solutions existent : la lame de diélectrique peut être insérée entre la membrane et la contre-électrode, mais il se peut également que l'une des faces du diélectrique soit métallisée et face office de membrane ou bien de contre-électrode. Les microphones à électret sont assez sensibles : leur sensibilité est de l'ordre de  $10$  à  $50$  mV/Pa, et ils présentent l'avantage de pouvoir être miniaturisés.

**Haut-parleur :** Dans le haut-parleur électrostatique, c'est la tension aux bornes des armatures qui est modifiée par le signal provenant de l'amplificateur. Comme  $d = \frac{\epsilon_0 S V}{Q}$ , il s'ensuit une variation de la distance inter électrodes, ce qui fait vibrer la membrane. Les haut-parleurs électrostatiques sont moins répandus que les haut-parleurs électrodynamiques. Ils rendent un son très "précis", mais comme ils reproduisent plus aisément les fréquences élevées, ils sont généralement associés à des haut-parleurs électrodynamiques pour la reproduction des basses fréquences.

**Remarques :** Les transducteurs électrodynamiques et électrostatiques sont les plus répandus. Cependant, il existe d'autres types de transducteurs : par exemple les transducteurs piézo-électriques. Un matériau piézo-électrique est un matériau qui produit un courant électrique lorsqu'il est déformé. Réciproquement, il se déforme lorsqu'il est soumis à un courant électrique. Les transducteurs piézo-électriques sont notamment utilisés pour les microphones de contact (directement placés sur un piano par exemple), ou pour les émetteurs d'ultrasons (utilisés par les sonars des bateaux par exemple).

### 6.3.3 Résumé

Dans un microphone électrostatique, la membrane constitue l'électrode d'un condensateur (l'autre électrode étant fixe). Ce condensateur est chargé par une tension de polarisation (typiquement  $48$  V). Sa capacité dépendant de la distance entre les deux électrodes, la vibration de

la membrane sous l'effet de l'onde acoustique se traduit par une variation de capacité et donc de tension électrique. Pour éviter les pertes de charges on place entre les deux électrodes du condensateur une résistance de forte impédance. Le signal de sortie est alors de faible niveau et on connecte ce dispositif à un préamplificateur. Ce type de micro présente une bonne réponse dynamique du fait du faible poids de la membrane. En revanche ils sont très sensibles à l'humidité et aux variations de températures. Ils sont donc destinés à des enregistrements d'intérieur (studio, concert...).

Les microphones à condensateur sont sensibles à des différences de pression entre les deux plaques d'un condensateur. La cellule microphonique se compose d'un diaphragme métallique fin placé à proximité d'une plaque arrière rigide. Les deux éléments sont électriquement isolés l'un de l'autre et forment, en présence d'une tension de polarisation continue, les deux armatures d'un condensateur. Les variations de pression acoustique entraînent un déplacement du diaphragme qui module la capacité du condensateur à la fréquence des ondes acoustiques.

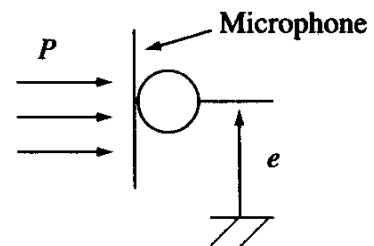
## 6.4 Caractéristiques des microphones

Les principales caractéristiques des microphones sont la sensibilité, la bande passante et la directivité.

### 6.4.1 Sensibilité

**Définition :** Lorsqu'un microphone reçoit une pression acoustique  $p$  (en pascals), il produit à ses bornes une tension électrique  $e$  (en volts). La sensibilité est définie comme le rapport entre la tension générée et la pression reçue :

$$s = \frac{e}{p} \quad (6.9)$$



On mesure la sensibilité en volt/pascal. Elle varie d'environ 2 mV/Pa à environ 20 mV/Pa. La sensibilité des microphones électrodynamiques est de l'ordre de quelques mV/Pa (Sennheiser MD441 : 1,8 mV/Pa, M88 Beyer : 2,3 mV/Pa). Les microphones électrostatiques sont nettement plus sensibles (Sennheiser MKH 106T : 20 mV/Pa, Neumann KM84 : 10 mV/Pa). La sensibilité dépend de l'angle d'incidence de l'onde sonore. Pour une onde frappant la membrane avec un angle  $\theta$ , on écrira plutôt la sensibilité sous la forme :

$$s(\theta) = \frac{e}{p(\theta)} \quad (6.10)$$

**Sensibilité en décibels :** la sensibilité s'exprime également en décibels. Si on prend comme référence  $s_{ref} = 1 \text{ V/Pa}$ , la sensibilité en décibels est alors définie comme :  $S_{dB} = 20 \log(s)$ . En fait, le décibel est défini comme le rapport de deux quantités. Rappelons que si on appelle  $p_{ref}$  la pression du seuil d'audition, le niveau sonore correspondant à une pression  $p$  est défini par :  $L_p = 20 \log\left(\frac{p}{p_{ref}}\right)$ . Pour la sensibilité d'un microphone, la définition est analogue, à ceci près qu'on introduit une sensibilité de référence  $s_{ref} = 1 \text{ V/Pa}$ . La sensibilité en décibel est alors définie par :

$$S_{dB} = 20 \log\left(\frac{s}{s_{ref}}\right) \quad (6.11)$$

Dire qu'un microphone a une sensibilité de -20 dB en référence à 1V/Pa, signifie que, s'il est soumis à une pression quelconque, ce microphone délivre une tension électrique inférieure de 20 dB à ce que délivrerait un microphone de sensibilité 1 V/Pa recevant la même pression. Par

exemple, une sensibilité de 1 mV/Pa correspond à -60 dB (en référence à 1 V/Pa). La sensibilité varie suivant le mode de transduction. Elle peut varier également avec la température, le degré hygrométrique de l'air ainsi qu'avec l'âge du microphone. Il est recommandé de la contrôler régulièrement. Les microphones de très bonne qualité ont une sensibilité indépendante de la fréquence dans un domaine de fréquences étendu.

**Bruit de fond :** C'est le bruit inhérent à tous système électrique (bruit thermique des résistances par exemple). Il est exprimé en niveau sonore équivalent (c'est à dire en multipliant la tension efficace due au bruit par la sensibilité) et généralement en dB :

$$L_{bf} = 20 \log \left( \frac{U_{bf}}{S p_0} \right) \quad (6.12)$$

**Rapport signal sur bruit :** c'est le logarithme du rapport entre la tension efficace utile et la tension efficace du bruit de fond.

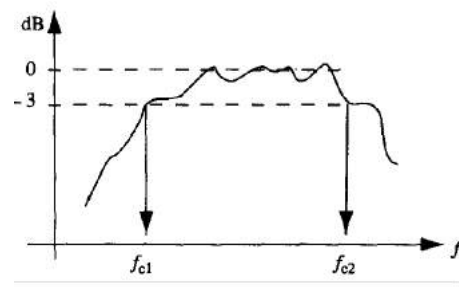
**Exemple :** Soit un son de pression efficace 1 Pa et un micro avec a une sensibilité  $S = 30$  mV/Pa. La tension utile délivrée par le micro est donc 30 mV. Si le bruit de fond du micro est de 25 dB, cela correspond à une tension utile  $U_{bf} = s p_0 \cdot 10^{\frac{L_{bf}}{20}} = 10^{-5}$  V ; d'où RSB = 69.5 dB.

#### 6.4.2 Réponse en fréquence

**Courbe de réponse :** On appelle courbe de réponse d'un microphone, la courbe représentant la variation de la tension électrique délivrée par le microphone, en fonction de la fréquence du son incident. Pour la mesurer, on soumet le microphone à un son sinusoïdal de fréquence variable, mais de pression constante (ce qui donne la courbe de la sensibilité en fonction de la fréquence). Pour que le microphone restitue le plus fidèlement possible les sons captés, la courbe de réponse doit être la plus plate possible.

**Bande passante :** Appelons  $s_{max}$  la sensibilité maximum du microphone. On appelle fréquences de coupure les fréquences pour lesquelles la sensibilité (mesurée en dB) est inférieure de 3 dB à la sensibilité maximum :  $S_{dB} = S_{max} - 3$  dB. Il y a deux fréquences de coupure, les fréquences de coupure haute et basse (respectivement notées  $f_{c1}$  et  $f_{c2}$ ). Pour chacune d'elles, la sensibilité est égale à  $\frac{S_{max}}{\sqrt{2}}$ .

On appelle bande passante l'étendue fréquentielle comprise entre les fréquences de coupure. Pour agir sur la bande passante, on peut, lors de la conception du microphone, augmenter le frottement à l'intérieur du microphone en ajoutant des matériaux absorbants. Dans ce cas, la fréquence de coupure basse diminue et la fréquence de coupure haute augmente, ce qui augmente aussi la largeur de la bande passante (cependant, il se trouve qu'une augmentation du frottement diminue aussi la sensibilité ; on ne peut donc pas améliorer à la fois la sensibilité et la bande passante).



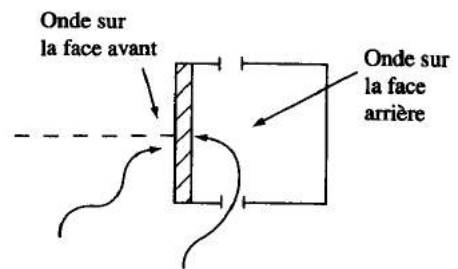
**Dynamique (en dB) :** c'est la différence entre le niveau maximum admissible et le niveau de bruit de fond. Niveau maximum admissible (en dB) : c'est le niveau acoustique maximum à 1000 Hz qui peut être enregistré en causant une distorsion du signal électrique inférieure ou égale à 0.5%.

**Microphone de pression :** un microphone de pression reçoit l'onde sonore uniquement sur l'une de ses faces. Or, dans les hautes fréquences, la longueur d'onde est petite devant les dimensions du microphone : le son est réfléchi par la membrane. En effet, un son dont la longueur d'onde est petite devant un obstacle, subit une réflexion géométrique sur cet obstacle. Près de la surface, la pression est doublée, car elle est la somme de la pression incidente et de la pression réfléchie. Il s'ensuit une augmentation de 6 dB du niveau sonore. En pratique, cela induit une "bosse" dans les hautes fréquences de la courbe de réponse. Cette accentuation se produisant essentiellement pour les ondes qui arrivent dans l'axe du microphone, on peut l'éviter en inclinant le microphone.

### 6.4.3 Directivité

#### Variation de la sensibilité avec l'angle d'incidence :

L'angle d'incidence du son (on le note  $\theta$ ) est l'angle que fait la droite reliant le microphone et la source, avec l'axe du microphone. On dit qu'un microphone est omnidirectionnel si la sensibilité ne dépend pas de l'angle d'incidence. C'est le cas d'un microphone de pression. On dit qu'un microphone est directif si sa sensibilité dépend de l'angle d'incidence du son. Les microphones directifs sont à gradient de pression. Un passage permet à l'onde sonore de frapper la face arrière de la membrane. Ainsi, la pression totale est la somme des pressions sur la face avant et sur la face arrière, et elle dépend de l'angle d'incidence. On définit les grandeurs suivantes :



- $s_{axe}$  : sensibilité du microphone pour une onde axiale ( $\theta = 0$ )
- $s(\theta)$  : sensibilité pour une onde d'incidence quelconque
- $s_{diff}$  : sensibilité en champ diffus. Comme le son réverbéré provient de toutes les directions, la sensibilité en champ diffus est en fait la moyenne de  $s(\theta)$  pour toutes les directions d'incidence

**Atténuation angulaire :** on définit la fonction de directivité pour chaque angle d'incidence  $\theta$  par :  $h(\theta) = \frac{s(\theta)}{s_{axe}}$ . Un son de pression  $p$  qui frappe la membrane dans l'axe produit une tension :  $u_{axe} = ps_{axe}$ . Un son de même pression  $p$ , mais frappant la membrane avec une incidence  $\theta$ , produit une tension :  $u_{\theta} = ps_{\theta}$ . Le rapport des tensions vaut :

$$\frac{u(\theta)}{u_{axe}} = \frac{s(\theta)}{s_{axe}} = h(\theta) \quad (6.13)$$

Or, nous avons vu que la différence de niveau sonore entre deux sons de pression  $p_1$  et  $p_2$  est égale à  $\Delta L = 20 \log \left( \frac{p_1}{p_2} \right)$ . De la même façon, on peut ainsi exprimer en décibels le rapport entre la tension produite par un son d'incidence  $\theta$ , et celle produite par un son axial de même pression :

$$20 \log \left( \frac{u(\theta)}{u_{axe}} \right) = 20 \log (h(\theta)) \quad (6.14)$$

Il s'agit donc d'une différence en dB, sur les niveaux électriques délivrés par le microphone.

**Diagramme de directivité :** Le point central représente la membrane du microphone. Pour chaque point faisant un angle d'incidence  $\theta$  avec la membrane, on trace un rayon dont la longueur est proportionnelle à l'atténuation de la sensibilité dans cette direction, c'est-à-dire à  $20 \log (h(\theta))$ . La figure ainsi obtenue s'appelle le diagramme de directivité du microphone. Les

figures a, b, et c illustrent respectivement les diagrammes de directivité d'un microphone cardioïde, supercardioïde, et bidirectif (un microphone bidirectif possède deux lobes symétriques de part et d'autre, ce qui est utile pour effectuer des interviews de conférenciers qui se font face par exemple).

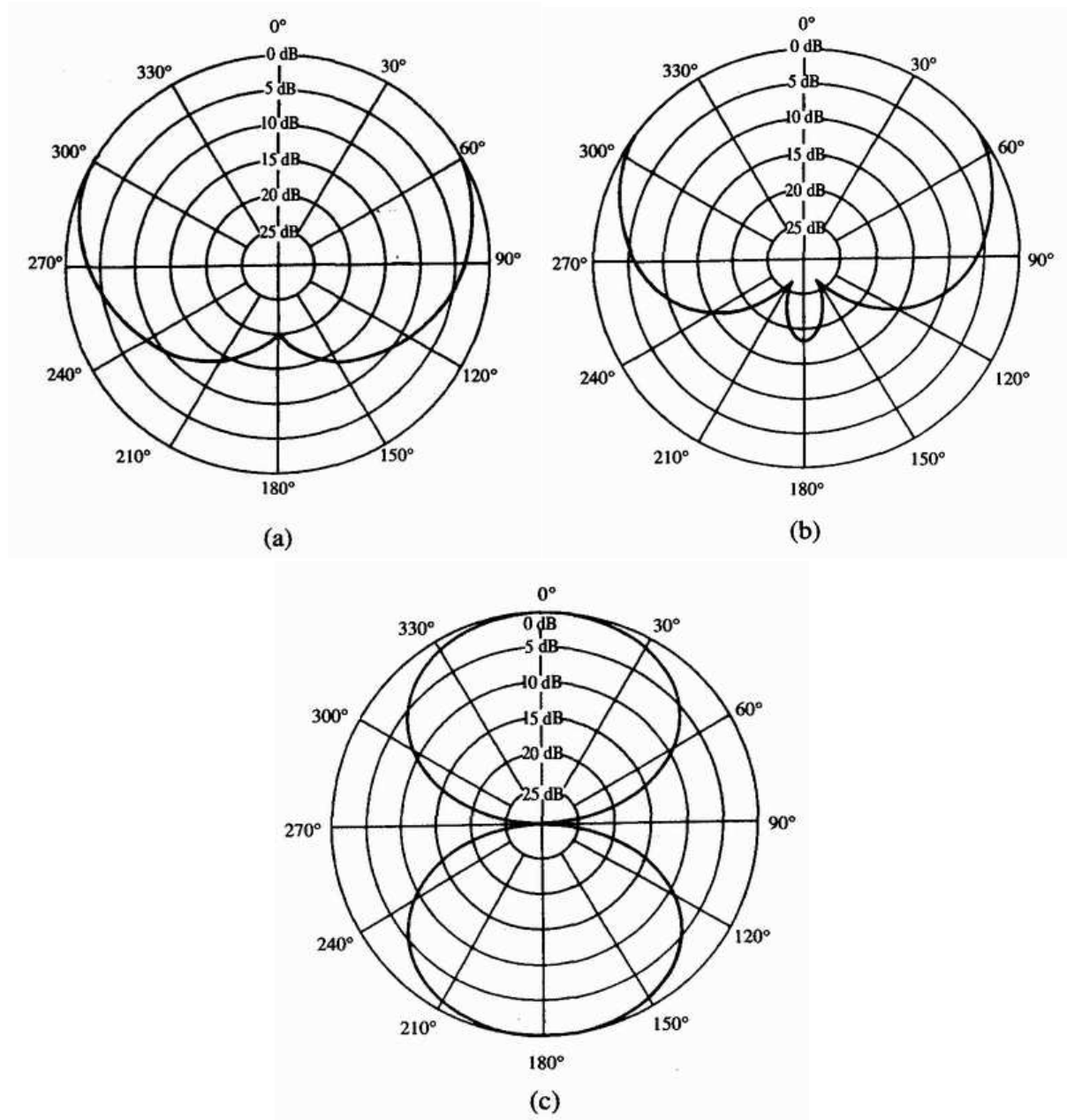


FIGURE 6.2 – Diagrammes de directivité

**Angle d'ouverture :** On appelle angle d'ouverture du microphone l'angle  $\theta$  pour lequel le niveau électrique délivré par le microphone est inférieur de 3 dB au niveau que le microphone délivrerait, si sa membrane était frappée par un son axial de même pression. On cherche donc  $\theta$  tel que :  $20 \log (h(\theta)) = -3 \text{ dB}$ .

**Facteur de directivité d'un microphone :** Précédemment, nous avons défini le facteur de directivité pour une source. Si on appelle  $I_{axe}$  l'intensité émise dans l'axe, et  $I_{moy}$  l'intensité moyenne

émise dans toutes les directions, le facteur de directivité est :  $Q = \frac{I_{axe}}{I_{moy}}$ .  $Q$  est un nombre sans dimension.

**Remarque sur les haut-parleurs :** Les haut-parleurs, tout comme les microphones, font appel aux différents principes de transduction présentés dans le paragraphe précédant. Ils sont caractérisés par :

- leur efficacité
- leur réponse en fréquence
- leur directivité

Notons qu'un haut-parleur unique est incapable de restituer l'ensemble des fréquences audibles. On fait donc appel à plusieurs haut-parleurs qu'il faut choisir les uns en fonction des autres (efficacité, impédance, courbe de réponse, puissance...). La réalisation de systèmes "multivoies" est délicate (réalisations de filtres répartiteurs, d'une enceinte adaptée...). Comme pour les microphones, le choix d'un haut-parleur ou la conception d'une source suppose un descriptif précis de l'objectif visé par la mesure. Dans le cas d'une mesure sous-tendue par une norme, la nature et la position des sources sont généralement précisées.