

Notions générales d'acoustique (Deuxième version)

Notations :

- Les vecteurs seront notés en souligné (ex \underline{v} pour la vitesse).
- Les mots en **gras** correspondent à des notions importantes ou du vocabulaire à connaître. Les formules importantes sont encadrées. L'annexe A répertorie ces notions et formules importantes
- Quelques exercices d'application sont présentés avec leurs corrections. Ils sont encadrés avec un trait pointillé.

Table des matières

<u>I Caractéristiques physiques du son</u>	<u>3</u>
a) Première définition.....	3
b) Caractérisations physiques des sons	4
c) Sources sonores.....	6
d) Les récepteurs	9
□	
<u>II Les niveaux sonores.....</u>	<u>11</u>
a) Le décibel	11
b) Les trois niveaux considérés	11
c) Analyse spectrale	14
d) Les niveaux pondérés.....	15
e) Autres niveaux	16
□	
<u>III Acoustique en milieu clos</u>	<u>17</u>
a) Réflexion de l'onde acoustique sur une paroi.....	17
b) Caractérisation des parois par leur facteur d'absorption:	17
c) Caractérisation des salles par leur aire d'absorption équivalente.....	18
d) Champ direct – champ réverbéré	18
e) Temps de réverbération.....	20
f) Absorption acoustique du bruit aérien	21
g) Isolation sonore.....	22
<u>Annexe :.....</u>	<u>25</u>
<u>A-Fiche récapitulative des notions abordées :</u>	<u>25</u>
<u>B-Obtention de l'équation d'onde acoustique:</u>	<u>29</u>
<u>C- Les microphones.....</u>	<u>32</u>

I Caractéristiques physiques du son

a) Première définition

Le son correspond à une vibration d'un milieu mécanique (fluide, solide) qui se propage dans le temps et dans l'espace avec une célérité c , dépendant du milieu de propagation. Il est produit par une source sonore (membrane de haut-parleur, voix, instrument de musique, frottement, etc.) et, à la différence de la lumière, sa propagation nécessite un milieu matériel.

On distingue différents types d'ondes sonores en fonction du milieu de propagation :

- Dans les milieux fluides (air, eau) : On trouve presque uniquement des ondes longitudinales de compression-dilatation. Il faut donc que le milieu en question soit **compressible**.
- Dans les milieux solides : On trouve en plus des ondes longitudinales (de compression-dilatation), des ondes transversales (induites par des contraintes de cisaillement. Ex : vibration d'une corde de piano), ondes de torsion.

On s'intéressera plus particulièrement dans ce qui suit à la propagation du son dans l'air (**transmission aérienne**) et dans les solides pour les problèmes d'acoustique du bâtiment (**transmission solidienne**).

La vibration sonore se traduit par la modification spatiale et temporelle des grandeurs caractéristiques du milieu de propagation. C'est à dire:

- la pression : $p = p_0 + p'(\underline{r}, t)$. Elle s'exprime en pascals (Pa).
- la vitesses particulières : $\underline{v} = \underline{v}_0 + \underline{v}'(\underline{r}, t)$. Elle s'exprime en mètres par secondes (m.s^{-1})

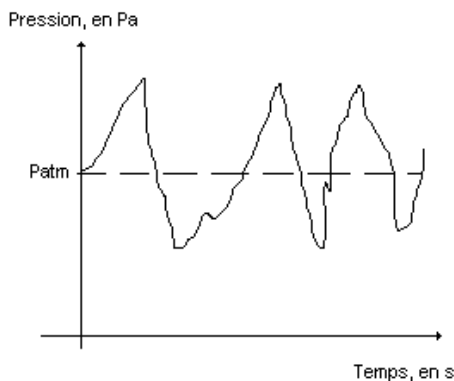
NB: *Une particule d'air en acoustique et plus généralement en mécanique des fluides est un volume d'air suffisamment petit (à l'échelle des dimensions du système considéré) pour être considéré comme infinitésimal, mais suffisamment grand pour contenir un grand nombre de molécules et ainsi pour pouvoir définir les grandeurs thermodynamiques classiques (température, pression, densité).*

- la densité : $\rho = \rho_0 + \rho'(\underline{r}, t)$. Elle s'exprime en kilogramme par mètre cube (kg.m^{-3}).
- la température : $T = T_0 + T'(\underline{r}, t)$. Elle s'exprime en kelvin (K) ou en degré Celcius.

Chaque variable peut donc être définie dans le cadre de l'acoustique comme la somme d'une valeur moyenne et d'une valeur fluctuante. C'est cette valeur fluctuante qui nous intéresse généralement et qui est appelée grandeur acoustique.

Exemple dans l'air :

Mesure de pression en une position \underline{r} donnée :



La pression totale correspond à la somme de la pression moyenne p_0 (généralement la pression atmosphérique) et la pression acoustique p' . Dans ce qui suit nous ne prendrons en compte que la pression acoustique que nous noterons simplement p .

NB :

- Ces quantités physiques n'évoluent pas indépendamment les unes des autres. On peut montrer que dans l'air, la connaissance de **deux variables** est suffisante pour caractériser complètement l'état du milieu. Généralement, on prend en compte la pression acoustique et la vitesse particulaire.
- Parmi ces quantités, on distingue des **grandeurs scalaires** (Température, pression, densité etc.) et des **grandeurs vectorielles** (vitesse particulaire) caractérisées par leurs composantes suivant les axes d'un repère donné.

b) Caractérisations physiques des sons

Dans ce qui suit, on considérera principalement la variable : pression acoustique. C'est une variable facilement mesurable au moyen d'un microphone.

Le son est principalement caractérisé par son aspect ondulatoire (même si on peut définir une « particule » sonore : le phonon, de même que l'on a défini la notion de photon pour la lumière). On retrouve alors les notions propres aux phénomènes ondulatoires :

- **Equation d'onde :** Le comportement spatial et temporel de la pression acoustique est régi par une relation appelée équation d'onde. L'obtention de cette équation est un peu longue et fastidieuse à présenter ici mais ceux qui le souhaitent peuvent se reporter en Annexe B. L'équation d'onde dans un milieu sans perte et ne contenant pas de source acoustique est donnée par: $\Delta p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$ où Δ est l'opérateur laplacien. Dans le cas d'une onde sinusoïdale de pulsation ω : $p(\underline{r}, t) = p(\underline{r}) \cdot \cos(\omega t)$, on trouve l'équation dite de Helmholtz : $\Delta p(\underline{r}) + k^2 \cdot p(\underline{r}) = 0$ où k : vecteur d'onde est défini par $k^2 = \frac{\omega^2}{c^2}$

- **Célérité du son c:** La vitesse à laquelle se propage l'onde acoustique dépend des caractéristiques physiques du milieu matériel. Par exemple, plus un milieu est dense, plus

cette célérité est grande : dans l'air $c \approx 340$ m/s, dans l'eau $c \approx 1500$ m/s, dans l'acier $c \approx 5000$ m/s.

Dans l'air, la célérité du son est donnée par l'expression : $c = \sqrt{\frac{1.4 * P_0}{\rho_0}}$ où P_0 est la pression

atmosphérique ($1.013 * 10^5$ Pa) et ρ_0 est la masse volumique de l'air (1.18 kg /m³ à 25° C). La masse volumique de l'air et donc la célérité varient en fonction de la Température, du degré d'humidité. On trouve par exemple la relation entre température et célérité du son : $c \approx 20\sqrt{T}$ où T est la température absolue (en kelvins K)

NB: Ne pas confondre célérité du son et vitesse particulière !

- **fréquence** : C'est le nombre de fois qu'un phénomène se reproduit dans une seconde (dans notre cas, le nombre d'oscillations par seconde). La fréquence s'exprime en hertz (Hz). Les multiples sont : le kilohertz (kHz), le megahertz (MHz), le gigahertz (GHz).

Quand on veut caractériser un son selon son contenu fréquentiel, on distingue généralement dans un premier temps :

- **Le son pur** : son sinusoïdal caractérisé par sa fréquence d'oscillation. (Ex : la du diapason, son sinusoïdal généré par un haut-parleur alimenté par un Générateur Basse Fréquence...). Un son pur de fréquence basse paraîtra plus grave qu'un son pur de fréquence plus élevée.
- **Le son complexe harmonique** : c'est une superposition de sons purs dont les fréquences sont multiples d'une fréquence appelée : fréquence fondamentale. (Exemple : voyelle « a », son d'instrument de musique.)
- **Le son complexe inharmonique** : C'est une superposition de sons purs dont les fréquences n'ont pas de lien entre elles.
- **Le bruit** : il correspond à une variation « aléatoire » de la pression acoustique. (Ex : Bruit blanc, bruit rose.)

Cette distinction est cependant un peu académique car dans la pratique les sons rencontrés comportent généralement une composante bruitée et une composante harmonique (exemple : son de saxophone. Partie bruitée venant du souffle du musicien).

- **Période** : L'inverse de la fréquence est la **période T** (Durée après laquelle le signal se reproduit identique à lui même à une position donnée). Elle s'exprime en secondes (s).
- **Longueur d'onde λ** : C'est la distance au bout de laquelle le signal se reproduit identique à lui même à un instant donné. Elle s'exprime en mètres (m). La relation entre longueur d'onde et période fait intervenir la célérité c : $\lambda = c * T$.
- **Amplitude** : On caractérise l'amplitude du son par une valeur efficace de pression.

Définition d'une valeur efficace :

La pression efficace est définie par la relation $p_{\text{eff}}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} (p^2(t') - \langle p(t') \rangle^2) dt'}$ où T est la durée d'intégration (généralement la période du son considéré) et $\langle p(t') \rangle$ est la moyenne temporelle de p (en général on considère des variables acoustiques de valeur moyenne nulle).

Exercice : Pression efficace correspondant au signal de pression $P(t)=A*\sin(\omega t+\varphi)$.

Réponse :

$$P_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{2\pi}{\omega} \int_t^{t+T} A^2 \sin^2(\omega t'+\varphi) dt'} = \sqrt{\frac{2\pi}{\omega} * A^2 * \frac{1}{2} * \frac{\omega}{2\pi}} = \frac{A}{\sqrt{2}}$$

- **Intensité et puissance acoustique** : Les ondes sonores mettent en mouvement des régions de l'espace initialement au repos. Elles transportent donc une énergie nécessaire à cette mise en mouvement. La notion d'énergie sonore se retrouve principalement dans les quantités suivantes : l'intensité et la puissance acoustique.

➤ L'**intensité acoustique instantanée** au point M et à l'instant t est par définition l'énergie qui traverse l'unité de surface centrée sur M à l'instant t. $\underline{I}(M, t) = p(M, t') * \underline{v}(M, t')$. L'intensité est une grandeur vectorielle. Elle est orientée suivant l'axe source-récepteur. Elle s'exprime en watts par mètre carré (W.m^{-2}).

➤ On considère généralement l'**intensité acoustique efficace** I_{eff} définie comme la valeur efficace de $I(M, T)$ projetée sur la direction source-récepteur (c'est donc une grandeur scalaire). Elle est définie par:

$$I_{\text{eff}}(M, t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} I^2(M, t) dt}$$

où T est la durée d'intégration typiquement égale à quelques périodes du signal.

➤ La **puissance acoustique instantanée** \underline{W} traversant une surface S à l'instant t est l'intégrale de l'intensité acoustique instantanée sur cette surface.

On la note $W(t) : W = \iint_S \underline{I}(r', t) * \underline{n}' dS'$ où \underline{n}' est un vecteur unitaire normal à l'unité de surface dS' . C'est une grandeur scalaire. Elle s'exprime en watts (W).

➤ De même que précédemment on considère principalement la **puissance**

acoustique efficace W_{eff} définie par: $W_{\text{eff}}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} W^2(t) dt}$

c) Sources sonores

Une onde acoustique est générée par une source sonore. Dans un premier temps, les sources sonores sont caractérisées par leur puissance acoustique efficace et leur directivité. Pour aborder le deuxième point il est nécessaire tout d'abord d'introduire (ou rappeler) quelques notions fondamentales concernant les différents types de surfaces d'ondes.

Surface d'onde :

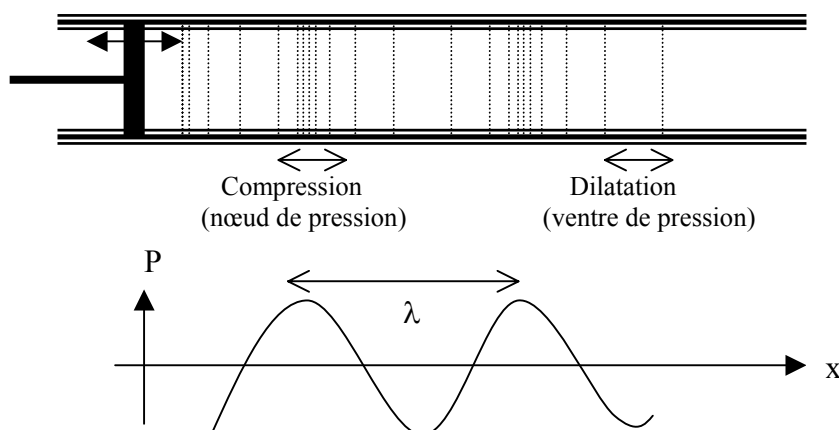
La surface d'onde est l'ensemble des points qui vibrent en phase à un instant donné. Les surfaces d'onde couramment considérées sont les plans (**ondes planes**), les sphères (**ondes sphériques**) et, dans une moindre mesure, les cylindres (**ondes cylindriques**). Pour les

surfaces plus complexes on se réfère généralement à l'un des 3 types précédents pondéré par un facteur correctif.

- Pour une onde plane, la pression en chaque point de l'espace est donnée par $P(\underline{r},t)=A*\cos(\underline{k}.\underline{r}-\omega t)$, où \underline{k} est le vecteur d'onde . A un instant t_0 , les points \underline{r} d'une surface d'onde donnée vérifient donc $\underline{k}.\underline{r}=\omega t_0$ (Il s'agit donc bien de l'ensemble des points d'un plan perpendiculaire à \underline{k}).

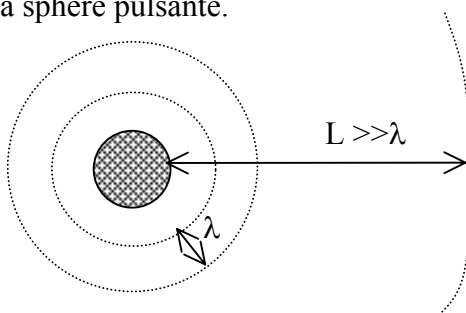
Exemple d'onde plane : le piston plan dans un tube cylindrique infini.

Visualisation des plans d'onde à un instant donné :



Si le piston vibre avec une vitesse $v = v_0 \cos(\omega t)$, les particules d'air situées dans le plan d'abscisse x ont alors pour vitesse $v(x,t) = v_0 \cos(\omega(t - \frac{x}{c}))$ où c est la célérité du son dans l'air (340 m s^{-1}).

- Source d'onde sphériques : la sphère pulsante.



La sphère pulsante est une sphère solide dont le rayon $r = r_0 + r(t)$ varie avec le temps et dont l'amplitude des oscillation $r(t)$ est petite devant r_0 . Les déformations de la surface solide engendrent des ondes acoustique sphériques concentriques.

Quand on s'éloigne de la sphère d'une distance $L \gg \lambda$, un élément de la surface d'onde peut être considéré comme un élément d'onde plane, la pression est alors donnée par :

$p(r,t) = \frac{A}{r} \cos(\omega(t - \frac{r}{c}))$. A un instant t , la pression acoustique est constante en chaque

point d'une sphère centrée sur la source. On qualifie une telle source de **source omnidirectionnelle**.

Puissance Caractéristique d'une source :

Une source est caractérisée premièrement par la **puissance acoustique efficace** qu'elle rayonne : W_{eff} . Cette puissance acoustique se répartit sur une surface S qui évolue lors de la propagation. Cette évolution peut correspondre à une **dispersion** de l'énergie acoustique (si S augmente au cours de la propagation. Ex : ondes sphérique), une **conservation** de l'énergie acoustique (S reste constante. ex : onde plane) une **focalisation** de l'énergie acoustique (si S diminue).

Dans le cas des ondes sphériques, la puissance rayonnée par la source W se répartit sur une sphère de rayon r (de surface $4\pi r^2$) qui s'élargit au cours de la propagation. L'intensité

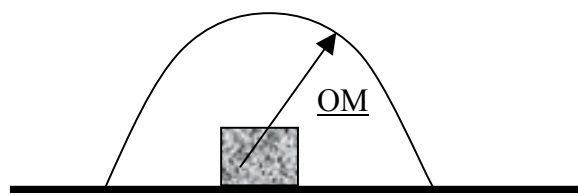
acoustique efficace en chaque point d'une sphère de rayon r est donnée par $I_{eff}(r) = \frac{W_{eff}}{4\pi r^2}$

Directivité des sources :

Dans le cas général ou la source n'est pas omnidirectionnelle, on définit le facteur de directivité Q qui traduit l'écart de directivité au cas idéal omnidirectionnel.

Définition : On appelle **Facteur de directivité (Q)** d'une source suivant la direction OM , le rapport entre l'intensité rayonnée dans la direction OM et l'intensité qui serait rayonnée dans la même direction par une source omnidirectionnelle (sphère pulsante) de même puissance acoustique totale.

Exercice : Calculer le facteur de directivité Q d'une source omnidirectionnelle de puissance acoustique W_{eff} posée sur le sol supposé parfaitement réfléchissant.



Source acoustique : W

Réponse :

La source acoustique est caractérisée par sa puissance acoustique W_{eff} . Comme elle est posée sur le sol, cette puissance acoustique se répartit lors de la propagation sur une demi-sphère (de rayon r , de surface $2\pi r^2$). L'intensité au point M de est donc : $I_{eff}(M) = \frac{W_{eff}}{2\pi r^2}$.

L'intensité au point M si la source de puissance W était omnidirectionnelle serait :

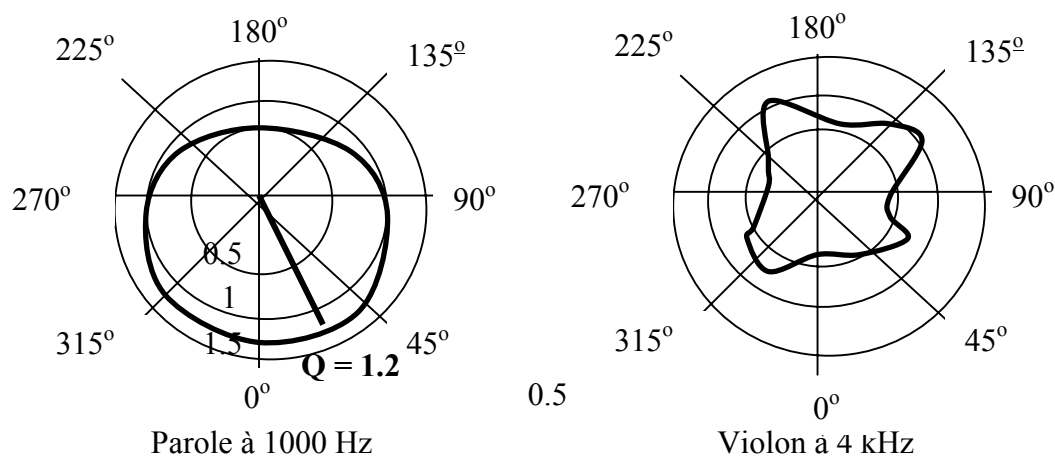
$$I_{eff}^{omni}(M) = \frac{W_{eff}}{4\pi r^2}. \text{ Le facteur de directivité } Q \text{ est donc égal à : } Q = \frac{W_{eff}}{2\pi r^2} * \frac{4\pi r^2}{W_{eff}} = 2$$

Dans le cas général de sources directionnelles (caractérisées par leur facteur de directivité Q)

la relation entre intensité efficace et puissance efficace devient :
$$I_{eff}(r) = \frac{W_{eff} * Q}{4\pi r^2}$$

NB : En général la directivité d'une source est complexe et dépend de la fréquence. Elle peut se mesurer en entourant la source de microphones placés à égale distance de la source. Elle se représente au moyen de diagrammes polaires de directivité représentant le facteur de directivité Q ou plus généralement l'indice de directivité $L_Q = 10 * \log(Q)$ (en dB) pour toutes les directions de l'espace . Dans l'exemple ci dessous à gauche, la directivité pour une direction de 30° est de 1.2. ($L_Q = 0.8$ dB)

Diagrammes de directivités dans le plan horizontal



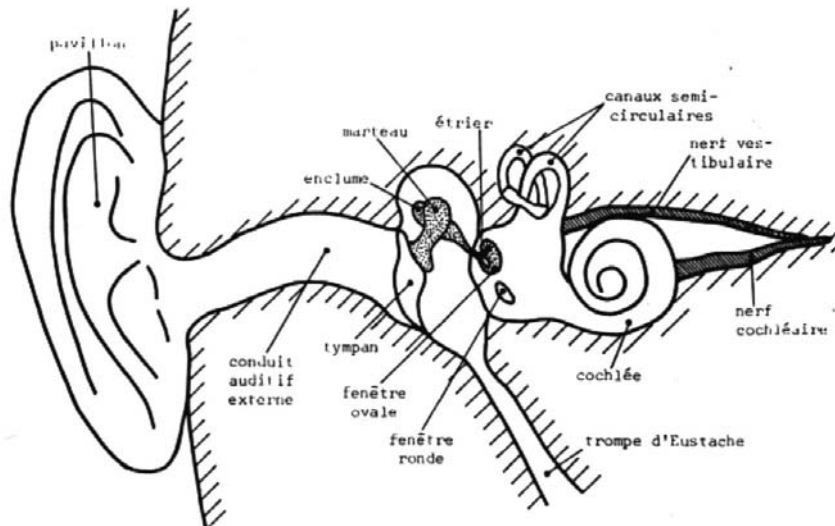
- Ces diagrammes polaires de directivités correspondent à l'intensité rayonnée dans un plan. On peut aussi avoir des diagrammes 3D représentant l'intensité rayonnée dans tout l'espace mais ils sont plus difficilement lisibles.
- On voit dans les deux exemples ci-dessus qu'à 1000 Hz, la parole est presque omnidirectionnelle alors que la directivité du violon à 4000 Hz est beaucoup plus irrégulière avec l'existence de lobes bien marqués.
- Dans ce qui suit on considérera généralement des directivités simples dépendant principalement du milieu de propagation (existence de surfaces réfléchissantes comme des dalles en bétons, des murs de salle...) qui donnent au facteur de directivité Q une valeur constante égale à 2,4,8...(Cf. TD 2)

d) Les récepteurs

microphones : Les récepteurs acoustiques couramment utilisés sont les microphones. Ils transforment la pression acoustique en signal électrique. Ils sont caractérisés par leur sensibilité , dépendant de la technologie utilisée (électrodynamiques, électrostatiques...) et par leur directivité (omnidirectionnel, bidirectionnel, cardioïde, micro « canon »).Cf Annexe C.

oreille humaine : C'est un récepteur très élaboré connecté à un « centre de traitement » non moins élaboré : le cerveau. On est loin de tout connaître sur la perception du son. Une discipline entière se consacre à ce domaine de recherche : la psycho-acoustique.

Voici un diagramme simplifié de l'anatomie de l'oreille.



Le système auditif peut être divisé en 2 parties :

- La partie périphérique : oreille externe (pavillon et conduit auditif externe) et oreille moyenne (tympan et osselets (marteau, enclume et étrier))
- La partie interne qui comprend un organe appelé membrane basilaire sur laquelle sont disposées des cellules ciliées (en forme de cils) qui transforment les vibrations mécaniques en message nerveux.

L'oreille agit comme **un analyseur de spectre**. Les cellules ciliées sont sensibles à des fréquences différentes en fonction de leur position le long de la membrane basilaire. Elles émettent un signal nerveux proportionnel à l'intensité du signal sonore dans cette fréquence.

L'étendue des fréquences audibles par l'oreille va de **20 Hz à 20 kHz**. On distingue généralement dans cet intervalle, 3 sous-intervalles :

- Les (fréquences) basses : de 20 à 200 Hz
- Les médiums : de 200 à 2000 Hz
- Les aiguës : de 2000 à 20000 Hz.

L'étendue des intensités audibles se répartit entre **le seuil d'audibilité** et **le seuil de douleur**.

La sensibilité de l'oreille n'est pas la même en fonction des fréquences (voir paragraphe sur les niveaux pondérés dans chapitre suivant). Cependant un ordre de grandeur du seuil d'audibilité est donné par le seuil à 1000 Hz : $p_{\text{eff}}=2.10^{-5}$ Pa. Le seuil de douleur est typiquement de quelques dizaines de pascals.

II Les niveaux sonores

a) Le décibel

Pour mesurer l'amplitude d'un son, on utilise généralement une grandeur logarithmique appelée décibel. Toute grandeur physique G peut être exprimée en décibel. Il suffit de se donner **une valeur de référence** G_0 . On forme ensuite le logarithme de base 10 du rapport $\frac{G}{G_0}$ (sans dimension): $\log(\frac{G}{G_0})$. On exprime ce rapport en **bel (B)** (ce n'est pas à proprement parler une unité physique mais plutôt une convention d'écriture). Le sous multiple du bel couramment utilisé est le **décibel (dB)**. Dans notre exemple, la quantité G aura une valeur en décibel de $10 * \log(\frac{G}{G_0})$ dB.

b) Les trois niveaux considérés

Définitions :

Par convention, les grandeurs que nous exprimons en décibel sont des valeurs efficaces de quantités proportionnelles à une énergie (intensité efficace, puissance efficace...).

- On définit le niveau de puissance sonore L_W correspondant à la grandeur : Puissance Acoustique Efficace. Il est égal à : $L_W = 10 * \log(\frac{W_{eff}}{W_0})$ où W_0 est la puissance de référence : $W_0 = 10^{-12} W$.

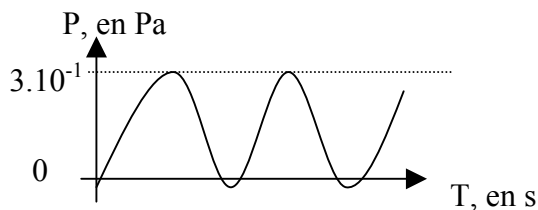
- De même, on définit le niveau d'intensité sonore L_I correspondant à la grandeur Intensité Acoustique Efficace par : $L_I = 10 * \log(\frac{I_{eff}}{I_0})$ où I_0 est l'intensité de référence : $I_0 = 10^{-12} W.m^{-2}$.

- On définit aussi un niveau de pression sonore L_p correspondant à la grandeur Pression Acoustique Efficace. Comme la pression n'est pas proportionnelle à une énergie mais que son carré l'est (Cf. chapitre II-b), on définit le niveau L_p par : $L_p = 10 * \log(\frac{P_{eff}^2}{P_0^2})$, ce qui revient à : $L_p = 20 * \log(\frac{P_{eff}}{P_0})$. La pression de référence est prise par définition à $p_0 = 2.10^{-5} Pa$. Elle correspond au seuil de pression minimal audible pour un son pur de fréquence : 1000 Hz.

NB : On trouve souvent dans la littérature la terminologie anglophone : dB (SPL) (« Sound Pressure Level ») en opposition avec les niveaux pondérés que nous allons définir par la suite.

Exercices:

1. Calculer le niveau de pression L_p d'un signal sinusoïdal d'amplitude $3 \cdot 10^{-1}$ Pa.



Réponse : Pression efficace : $P_{eff} = \frac{3 \cdot 10^{-1}}{\sqrt{2}}$ Pa

$$L_p = 20 * \log\left(\frac{3 \cdot 10^{-1}}{\sqrt{2} * 2 \cdot 10^{-5}}\right) = 80.5 \text{ dB}$$

2. Niveau d'intensité L_I d'un signal d'intensité efficace $I_{eff} = 10^{-3}$ W.m⁻²

Réponse : $L_I = 10 * \log\left(\frac{10^{-3}}{10^{-12}}\right) = 90 \text{ dB}$

Pourquoi une grandeur logarithmique ?

On peut donner deux raisons à l'utilisation d'une grandeur logarithmique comme le décibel.

- Premièrement, une raison pratique. Les pressions acoustiques tolérées par l'oreille humaine couvrent une large étendue. Du son le plus faible (seuil d'audibilité, typiquement 10^{-5} Pa) au son le plus fort (seuil de douleur, typiquement 10 Pa) il y a un rapport de 10^6 . L'intérêt d'une échelle logarithmique est de compresser la gamme de valeurs utilisées. Ainsi du son le plus faible (0 dB) au son le plus fort (120 dB), on reste dans un intervalle réduit plus simple à manipuler.
- Deuxièmement, une raison physiologique. Chez l'homme la sensation de force d'un son varie approximativement avec le logarithme de l'intensité sonore et non avec l'intensité sonore elle-même. C'est à dire : un son d'intensité I_1 paraîtra approximativement 2 fois plus fort qu'un son d'intensité I_2 si $I_1 = I_2^2$ (et non $I_1 = 2 * I_2$) donc si $\log(I_1) = 2 * \log(I_2)$.

Relations entre les niveaux L_I , L_p , L_W :

- L_p et L_I : Dans le cas d'ondes planes en milieu extérieur, la relation entre la pression

efficace et l'intensité efficace est : $I^{eff} = \frac{P_{eff}^2}{\rho_0 c}$

La relation entre les niveaux L_I et L_p est donc simple dans ce cas là.

$$L_I = 10 * \log\left(\frac{I_{eff}}{I_0}\right) = 10 * \log\left(\frac{P_{eff}^2}{\rho_0 c * I_0}\right) = 20 * \log\left(\frac{P_{eff}}{\sqrt{\rho_0 c * I_0}}\right)$$

or $\sqrt{I_0 * \rho_0 c} = \sqrt{400 \cdot 10^{-12}} = 2 \cdot 10^{-5} = p_0$. On trouve donc $L_p = L_I$

NB : La plupart du temps on ne considère que des ondes du type onde plane (on se place suffisamment loin des sources pour être localement dans ce cas), la relation $L_p = L_I$ est donc générale. Cependant en milieu clos, cette relation cesse d'être vraie à cause du champ réverbéré (Cf. Chapitre III)

- L_I et L_W : On a vu dans la définition d'un plan d'onde sphérique, que lorsque on se situe à une distance très supérieure à la longueur d'onde acoustique, on pouvait considérer localement la surface d'onde comme plane. De plus, nous avons vu dans la définition de la puissance acoustique d'une source d'ondes sphériques la relation entre I et W.

Nous pouvons donc en déduire la relation entre les niveaux L_I et L_W .

$$L_W = 10 * \log\left(\frac{W_{eff}}{W_0}\right) = 10 * \log\left(\frac{I_{eff} * 4\pi r^2}{Q * W_0}\right) = 10 * \log\left(\frac{I_{eff}}{I_0}\right) + 10 * \log\left(\frac{4\pi r^2 * I_0}{Q * W_0}\right).$$

Si on note r_0^2 le rapport $\frac{I_0}{W_0}$ ($r_0 = 1m$), on obtient

$$L_I = L_W + 10 * \log\left(\frac{Q}{4\pi \left(\frac{r}{r_0}\right)^2}\right)$$

Composition des niveaux sonores :

Soient N sources acoustiques S_1, S_2, \dots, S_N , créant les pressions acoustiques p_1, p_2, \dots, p_N . En un point M donné la pression acoustique instantanée totale est la somme des pressions acoustiques instantanées : $p(M) = p_1(M) + p_2(M) + \dots + p_N(M)$ (c'est ce qu'on appelle le principe de superposition qui n'est rien d'autre qu'une conséquence de la linéarité du milieu de propagation).

La pression efficace totale est donc donnée par :

$$p_{eff}^2(M) = \frac{1}{T} \int (p_1 + p_2 + \dots + p_N)^2 dt$$

c'est à dire par :

$$p_{eff}^2(M) = \frac{1}{T} \int (p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_N^2 + 2p_1p_2 + \dots) dt$$

Dans le cas où les pressions ne sont pas corrélées (c'est le cas généralement si elles proviennent de sources distinctes) les valeurs moyennes des doubles produits s'annulent (ou sont très petites par rapport aux pressions au carré moyennes) . **Le carré de la pression efficace totale est donc la somme des pressions efficaces de chaque source au carré :**

$$p_{eff}^2(M) = p_{eff1}^2 + p_{eff2}^2 + \dots + p_{effN}^2$$

Concernant les niveaux L_p et L_I On obtient :

$$L_p = 20 * \log\left(\frac{p_{eff}}{p_0}\right) = 10 * \log\left(\frac{p_{eff}^2}{p_0^2}\right) = 10 * \log\left(\frac{p_{eff1}^2 + p_{eff2}^2 + \dots + p_{effN}^2}{p_0^2}\right)$$

Si on connaît les niveaux L_p^i de chaque source i, on doit effectuer l'opération inverse du

logarithme de base 10 pour revenir aux pressions efficaces : $\frac{p_{effi}^2}{p_0^2} = 10^{\frac{L_{p_i}}{10}}$

On a donc :
$$L_p^{total} = 10 * \log(10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{pN}}{10}})$$

NB : Si les sources sont corrélées, on se trouve en face du phénomène d'interférence. La pression efficace totale au carré n'est plus alors la somme des carrés des pressions efficaces isolées. Une application en pleine essor utilisant ce phénomène est le **contrôle actif** du bruit. On peut en effet forcer ce phénomène d'interférence pour diminuer le niveau sonore en un endroit donné en lui envoyant ce même signal légèrement décalé dans le temps (en opposition de phase). Cela nécessite cependant un important dispositif électronique (micro+traitement du signal+haut-parleur).

c) Analyse spectrale

L'information contenue dans le niveau sonore est une information globale au niveau du contenu fréquentiel. On a vu que la sensibilité de l'oreille humaine diffère en fonction de la fréquence et que l'oreille agit elle-même comme un analyseur de spectre. On a donc souvent besoin de connaître plus précisément le contenu spectral d'un signal mesuré. On utilise pour cela des niveaux par bandes de fréquence. On définit plus particulièrement :

- **Les niveaux par bandes d'octaves.**

Rappel : Deux sons de fréquence f_1 et f_2 sont séparés d'une octave si

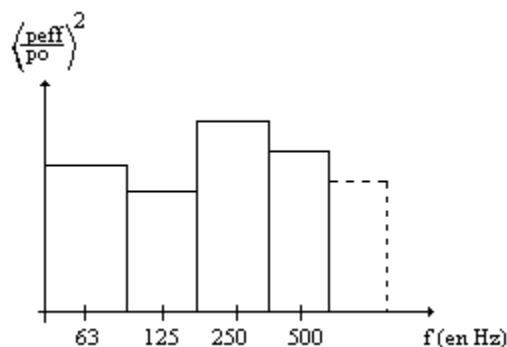
$$f_2 = 2 * f_1$$

Définition : On appelle bande d'octave centrée sur la fréquence f_0 l'intervalle de

fréquence : $[\frac{f_0}{\sqrt{2}}, f_0 * \sqrt{2}]$.

L'étendue des fréquences audibles (20 Hz – 20 kHz) est généralement divisée en 9 bandes d'octaves centrées sur 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz, 8000 Hz, 16000 Hz.

Voici un exemple de spectre par bande d'octave :



Le niveau total en dB est donné par :

$$L_p = 10 * \log(\frac{P_{63}^2}{P_0^2} + \frac{P_{125}^2}{P_0^2} + \frac{P_{250}^2}{P_0^2} + \frac{P_{500}^2}{P_0^2} + \dots)$$

Si maintenant le spectre est donné en dB par bandes d'octaves (c'est généralement le cas) on obtient :

$$Lp = 10 * \log(10^{\frac{Lp_{63}}{10}} + 10^{\frac{Lp_{125}}{10}} + 10^{\frac{Lp_{250}}{10}} + 10^{\frac{Lp_{500}}{10}} + \dots)$$

• **Les niveaux par tiers d'octave.**

Définitions : Deux sons de fréquence f_1 et f_2 sont séparés d'un tiers d'octave si

$$f_2 = \sqrt[3]{2} * f_1 = 2^{\frac{1}{3}} * f_1. \text{ On appelle bande tiers d'octave centrée sur la fréquence } f_0$$

$$\text{l'intervalle de fréquence : } [\frac{f_0}{\sqrt[3]{2}}, f_0 * \sqrt[3]{2}]$$

Chaque bande d'octave précédemment définie peut donc être subdivisée en trois bandes de tiers-d'octave. la relation entre la fréquence centrale d'une bande d'octave f_c^{oct} et les 3 fréquences centrales des bandes tiers d'octave $f_{c,1,2,3}^{tiers_oct}$ est :

$$f_{c,1}^{tiers_oct} = \frac{f_c^{oct}}{\sqrt[3]{2}}, f_{c,2}^{tiers_oct} = f_c^{oct}, f_{c,3}^{tiers_oct} = f_c^{oct} * \sqrt[3]{2}$$

Exemple : la bande d'octave centrée sur 125 Hz peut être décomposée en 3 bandes tiers d'octave centrées sur 100 Hz, 125 Hz et 160 Hz

Le niveau total s'exprime comme dans le cas précédent en remplaçant les niveaux par bande d'octave par les niveaux tiers-d'octave.

d) Les niveaux pondérés

Pour prendre en compte le fait que l'oreille humaine n'a pas la même sensibilité en fonction de la fréquence, on a été amené à pondérer les niveaux dans chaque bande de fréquences. Différents types de pondération existent (A, B, C) mais on utilise plus principalement la pondération A (notée dB(A)).

Voici les coefficients de pondération A par bandes d'octaves (en dB) :

Bande de fréquence (en Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Pondération A (en dB)	-26	-16	-9	-3	0	+1	+1	-1

L'intérêt d'une telle pondération est de pouvoir comparer des signaux sonores en fonction de leur intensité perçue. Par exemple, si l'on écoute deux signaux s_1 et s_2 de fréquence 50 Hz et 1000Hz et de niveau 50 dB. Ils ne paraîtront pas avoir la même intensité. En revanche, si ces deux signaux sont de niveau 50 dB (A), ils paraîtront avoir la même intensité (Cf : TD .1)

NB :

- *Pondérer un signal revient à multiplier son énergie par bande d'octave (ou son intensité ou sa pression au carré) par un coefficient de pondération dépendant de la fréquence. Quand on considère des niveaux en dB cela revient à ajouter aux niveaux par bande d'octave (en dB) les coefficients en dB mentionnés dans le tableau ci-dessus .*
- *Les appareils de mesures (sonomètres) disposent généralement d'un banc de filtres (analogique ou numérique) permettant le calcul des niveaux par bande de fréquence et la pondération directe du signal.*

Exemple :

On souhaite calculer le niveau en dB(A) d'un signal dont les niveaux par bande d'octave sont répertoriés ci-dessous :

Bande de fréquence (en Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Niveau L_p (en dB)	90	85	83	83	80	78	78	75

Le niveau global en dB(A) s'exprime en ajoutant à chaque niveau par bande d'octave le coefficient de pondération correspondant et en calculant ensuite le niveau global. Cela donne :

$$L_p = 10 * \log(10^{\frac{L_{p_{63}}-26}{10}} + 10^{\frac{L_{p_{125}}-16}{10}} + 10^{\frac{L_{p_{250}}-9}{10}} + 10^{\frac{L_{p_{500}}-3}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{p_{8000}}-1}{10}})$$

On obtient finalement $L_p = 86.2$ dB(A).

e) Autres niveaux

En acoustique de l'environnement, on définit de nombreux niveaux que l'on cherche à corréler avec les sensations perceptives (généralement la gêne causée par un bruit).

- Le niveau couramment utilisé (pour le bruit routier par exemple) est le niveau équivalent (ou niveau **Leq**). Il correspond à la moyenne du niveau entre 2 instants t_1 et t_2 ou pendant une durée T (par exemple 8 heures dans les mesures de niveaux quotidiens). Il est défini

$$\text{par : } Leq_{t_1 \rightarrow t_2} = 10 \log \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{I_{eff}(t)}{I_0} dt \right) = 10 \log \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{L_I(t)}{10}} dt \right)$$

- Une des normes caractérisant le niveau de bruit à ne pas dépasser dans des locaux utilise le **Niveau d'Exposition Sonore Quotidienne (L_{ESQ})** défini par :

$$L_{ESQ} = Leq_T(dB(A)) + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right) \text{ où } T_0 \text{ est la durée quotidienne de travail moyenne (8$$

heures) et T est la durée d'exposition à un bruit de niveau supérieur ou égal à 85 dB(A). Le niveau L_{ESQ} s'exprime en dB(A). **La loi du 28/04/88** précise que le L_{ESQ} doit être inférieur ou égal à 85 dB(A).

Exercice

Combien de temps peut travailler un ouvrier à un niveau moyen de 89 dB(A) pour respecter la loi du 28/04/88.

Réponse: Pour respecter la loi, le niveau L_{ESQ} doit être inférieur ou égal à 85 dB(A). On

veut donc $10 \log \left(\frac{T(s)}{28800} \right) = 85 - 89$ c'est à dire : $T = 28800 * 10^{\frac{-4}{10}} = 11465$ s soit 3h 11m

5s.

- Dans le cas de bruits percussifs (marteau piqueur, machine à choc), on utilise par exemple les niveaux moyens pondérés par le niveau crête.
- On définit aussi l'**indice NR** (noise rating) à partir de courbes d'égales sensation d'intensité (courbes isosones) comme l'indice de la courbe isosone supérieure ou égale aux niveaux par bandes d'octave du son considéré. (Cf TD 1)

III Acoustique en milieu clos

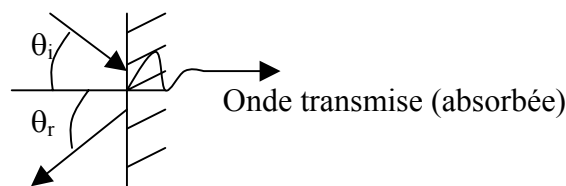
Nous avons jusqu'ici considéré de façon très générale la propagation du son dans des milieux quasi-infinis, sans perte. Or il est évident que dans la pratique, les ondes sonores rencontrent de nombreux obstacles lors de leur propagation. Elles subissent alors les phénomènes de diffraction, diffusion ou d'absorption par les parois des obstacles. Un cas pratique important concerne la propagation des ondes dans des milieux clos (salles de concert, bâtiment etc..).

Des effets perceptifs connus dans ce type de milieux sont par exemple l'écho de sa propre voix (dans une grotte, un tunnel), le temps de réverbération dans une cathédrale. Ces deux effets sont dus à la réflexion du son sur les parois et à l'effet que cela implique sur notre perception. L'acoustique des salles est la discipline qui étudie ce type d'effet. Elle relie des considérations physiques (propagation et réflexion du son sur les parois, calcul du temps de réverbération) aux aspects perceptifs (intelligibilité de la parole dans une salle donnée, « coloration » de la salle).

Dans un premier temps nous allons introduire la notion d'absorption sonore par les parois. Nous verrons ensuite que cette notion est importante dans la pratique pour caractériser acoustiquement un matériau donné. Nous définirons ensuite les notions liées à la réverbération du son sur les parois.

a) Réflexion de l'onde acoustique sur une paroi

Une onde acoustique rencontrant une paroi est en partie réfléchiée et en partie transmise (absorbée).



La partie transmise peut être dissipée sous forme de chaleur (exemple: absorption par la laine de verre), ou peut être transmise à un autre milieu sous forme d'ondes acoustiques.

b) Caractérisation des parois par leur facteur d'absorption:

Soit une paroi d'un matériau donné, de surface S , sur laquelle vient se réfléchir une onde acoustique incidente. On définit le **facteur d'absorption α** du matériau considéré comme le rapport entre la puissance acoustique absorbée par la paroi et la puissance

acoustique incidente. (C'est un nombre sans dimension) : $\alpha = \frac{W_{\text{absorbée}}}{W_{\text{incidente}}}$

NB :

- On a $0 \leq \alpha \leq 1$ (du fait que $W_{\text{absorbée}} \leq W_{\text{incidente}}$)
 - $\alpha = 1$ correspond à un matériau parfaitement absorbant (ex : un trou dans la paroi ! (Cf TD 2))
 - $\alpha = 0$ correspond à un matériau parfaitement réfléchissant (ex : béton)
- α varie en fonction de la fréquence considérée. On donne en général les valeurs d' α par bande d'octave (α_{63} , α_{125} , α_{250} ...)

c) Caractérisation des salles par leur aire d'absorption équivalente.

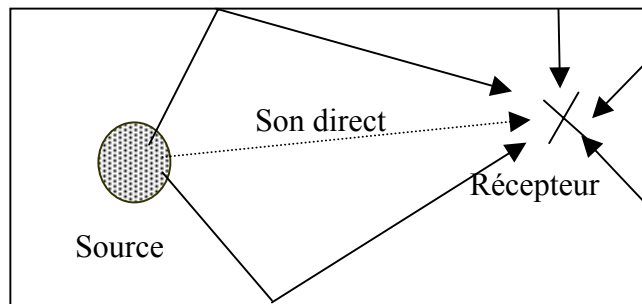
De même que l'on a défini la notion de facteur d'absorption pour un matériau donné, on définit de façon plus globale l'aire d'absorption équivalente A d'une salle : $A = \sum_i \alpha_i S_i$ où i est l'indice de chaque surface des différents matériaux qui composent la salle, α_i est le facteur d'absorption du matériau de la surface S_i . A s'exprime en m^2 .

- Quand l'aire d'absorption équivalente est égale à l'aire de la salle (ie : les coefficients α_i sont tous égaux à 1) on parle de salle **anéchoïque (ou chambre sourde)**.
- Quand, au contraire, l'aire d'absorption équivalente de la salle est nulle (ie : les coefficients α_i sont tous nuls) on parle de salle **réverbérante**.

d) Champ direct – champ réverbéré

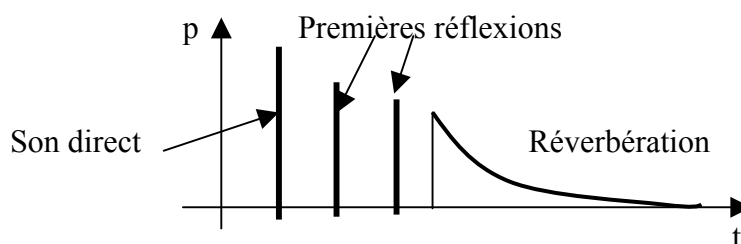
Considérons une source sonore dans une salle et un auditeur placé à une distance R de la source. La source émet un bruit impulsif très court (coup de pistolet). L'auditeur perçoit alors deux types de sons provenant de la source sonore :

- le son direct qui n'a pas subi de réflexion sur les parois.
- Un ensemble de sons ayant subi une ou plusieurs réflexions sur les parois.



Au bout d'un certain temps, les ondes ont été réfléchies un très grand nombre de fois (en étant en partie absorbée à chaque réflexion). Elles proviennent de toutes les directions de l'espace et le niveau de pression dû à ces ondes est **uniforme** dans la salle.

Voici un exemple de signal enregistré après l'émission d'un bruit impulsif (échogramme)



NB : Le son mesuré par un micro et représenté sur l'échogramme est différent du son perçu par le système auditif. En effet celui-ci a un temps d'intégration de l'information sonore approximativement compris entre 30 et 40 ms. Si les premières réflexions arrivent pendant ce temps d'intégration, le système auditif 'mélange' les informations et l'on n'entend que le premier événement (le son direct). En revanche si les premières réflexions arrivent après cette durée d'intégration alors on les entend distinctement. C'est l'effet bien connu d'**écho**.

Si maintenant la source émet de façon continue, on peut distinguer en tout point de la salle :

- Le champ direct provenant de la source (sans avoir été réfléchi)
- Le **champ réverbéré** (ou **champ diffus**): ensemble des ondes réfléchies.

On a vu précédemment que la pression efficace du champ direct est donnée par :

$$p_{eff\ dir}^2 = \rho c * \frac{W_{eff} Q}{4\pi r^2} \text{ où :}$$

- W est la puissance acoustique de la source
- Q est le coefficient de directivité.

On peut montrer que la pression efficace **du champ réverbéré** est donnée par :

$$p_{eff\ rev}^2 = \rho c * \left(\frac{W_{eff} * 4}{A} \right) \text{ où}$$

- W est la puissance acoustique de la source
- A est l'aire d'absorption équivalente de la salle.

De même la relation entre pression et intensité dans le cas du champ diffus est donnée par :

$$I_{eff\ rev} = \frac{p_{eff\ rev}^2}{4 * \rho * c} \text{ (noter la présence du facteur 4 qui différencie de la relation générale (ondes planes) entre p et I).}$$

La relation entre le niveau de pression et le niveau d'intensité en champ réverbéré n'est pas la même qu'en champ direct.

$$\text{On a : } L_I^{rev} = 10 * \log\left(\frac{I_{eff\ rev}}{I_0}\right) = 10 * \log\left(\frac{p_{eff\ rev}^2}{I_0 * 4 * \rho * c}\right) = 10 * \log\left(\frac{p_{eff\ rev}^2}{p_0^2 * 4}\right) = 20 * \log\left(\frac{p_{eff\ rev}}{p_0 * 2}\right).$$

$$\text{Finalement on obtient : } \boxed{L_I^{rev} = L_p^{rev} - 6dB}$$

NB : Le champ réverbéré ne dépend pas de la distance à la source, c'est donc un champ moyen qui est uniforme dans toute la salle. En revanche il dépend de l'absorption de la salle. Cela paraît normal puisque à chaque réflexion, une partie de l'énergie acoustique incidente est absorbée par le pari. Le champ généré par ces ondes réfléchies sur toutes les surfaces de la salle doit donc prendre en compte l'absorption « moyenne » de la salle, ce que traduit l'aire d'absorption équivalente.

Une fois déterminés séparément le champ direct et le champ réverbéré, on peut définir le champ total dans une salle. Comme le champ direct et le champ réverbéré n'ont pas de relation de phase, la pression efficace totale au carré est la somme des pressions efficaces au carré du champ direct et du champ réverbéré. On a donc :

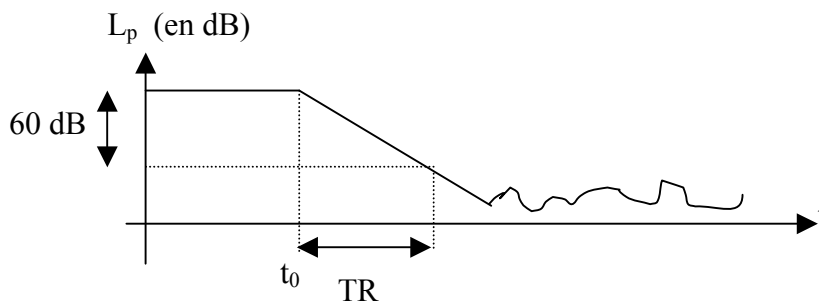
$$p_{\text{tot}}^2 = \rho c * \left(\frac{Q * W_{\text{eff}}}{4\pi r^2} + \frac{4W_{\text{eff}}}{A} \right) \text{ et donc : } L_p = L_w + 10 * \log\left(\frac{Qr_0^2}{4\pi r^2} + \frac{4r_0^2}{A}\right)$$

On appelle **distance critique**, la distance à la source à partir de laquelle le niveau de champ direct devient inférieur au niveau de champ réverbéré.

NB : *Le champ total est le seul qui soit mesuré concrètement. Cependant quand on se situe à une distance supérieure à la distance critique, on suppose généralement que le champ total est approximativement égal au champ réverbéré.*

c) Temps de réverbération

Soit une source émettant un bruit continu que l'on coupe à l'instant t_0 . **Le temps de réverbération TR** est défini comme le **temps nécessaire pour que le niveau de pression acoustique soit réduit de 60 dB** par rapport à sa valeur initiale.



Le temps de réverbération est l'une des caractéristiques importantes d'une salle. L'américain W. C. Sabine a le premier déterminé la relation entre le temps de réverbération et les autres caractéristiques de la salle.

$$TR = 0.16 * \frac{V}{A} \text{ où } V \text{ est le volume de la salle et } A \text{ son aire d'absorption équivalente.}$$

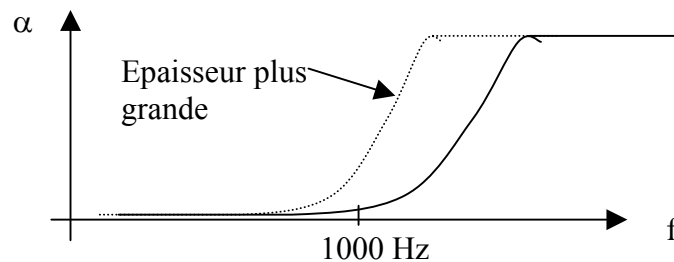
NB :

- *La relation de Sabine sera la seule utilisée dans ce cours, elle concerne principalement le cas où le local est homogène et peu réverbérant. D'autres formules plus complexes existent (formule d'Eyring par exemple).*
- *Le TR est souvent donné en bande d'octave. La définition en est simple : c'est le temps nécessaire pour que la pression acoustique efficace **dans la bande d'octave considérée** soit réduite de 60 dB par rapport à sa valeur initiale.*
- *A aire d'absorption constante, quand le volume augmente le TR augmente (effet de la taille de la salle : par exemple une cathédrale comparée à une petite église). De même à volume fixé, quand l'aire d'absorption augmente le TR diminue.*
- *On peut définir des TR optimaux pour chaque salle en fonction de son utilisation. On choisit généralement des TR courts dans les locaux industriels, des TR longs en salle de concert symphonique... Certaines salles (polyvalentes) doivent pouvoir s'adapter en fonction du type d'utilisation. On peut utiliser des panneaux absorbants mobiles pour jouer sur le paramètre A, on peut aussi modifier le volume V (plafond mobile).*

f) Absorption acoustique du bruit aérien

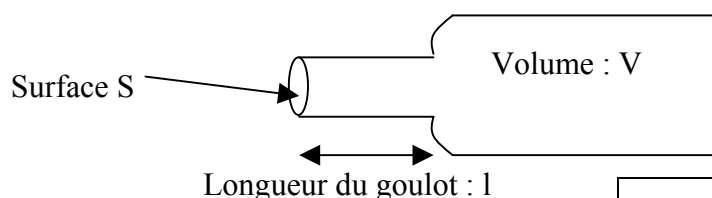
Différents types de structures sont utilisées pour absorber le bruit aérien. Une structure donnée est généralement efficace dans une bande de fréquence réduite. On procède alors à l'utilisation combinée de plusieurs types de matériaux ou de structures absorbantes pour couvrir l'étendue des fréquences audibles. On définit principalement trois types de structures absorbantes :

- **Les matériaux poreux** (laine de verre, laine de roche, mousses). Ils permettent de dissiper l'énergie sonore sous forme de chaleur. L'absorption d'un matériau poreux dépend de la fréquence de l'onde incidente (plus la fréquence est élevée meilleure est l'absorption), de l'épaisseur du matériaux, etc... Voici l'allure de la courbe d'absorption d'un matériau poreux en fonction de la fréquence.



- **Les résonateurs acoustiques** (placoplatre perforé, bois perforé). L'onde acoustique qui atteint le résonateur est « capturée » et dissipée par lui. Généralement un résonateur acoustique est couplé avec un matériau poreux qui permet d'augmenter la dissipation de l'énergie acoustique capturée sous forme de chaleur.

Un exemple typique de résonateur acoustique (où résonateur de Helmholtz) est la bouteille en verre.

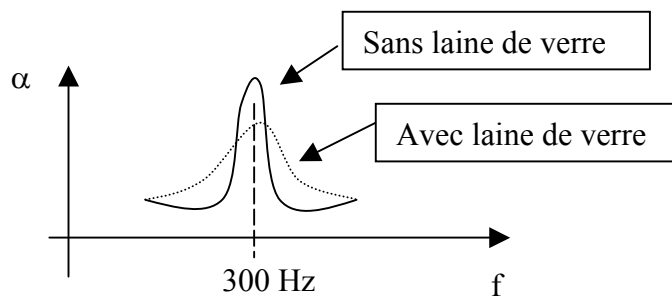


La fréquence fondamentale de résonance est donnée par : $f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V * l}}$

Exercice: Donner la fréquence de résonance acoustique d'une bouteille de bordeaux de dimensions: $l = 7 \text{ cm}$, $V = 75 \text{ cl}$, diamètre du goulot = 1.8 cm .

Réponse: On trouve : $f_0 \approx 120 \text{ Hz}$.

Dans le cas des panneaux perforés, chaque trou joue le rôle d'un petit résonateur qui absorbe une partie de l'énergie acoustique incidente au voisinage de sa fréquence de résonance. Les fréquences absorbées sont des fréquences moyennes ($250 \text{ Hz} < f < 1000 \text{ Hz}$). Voici l'allure de la courbe d'absorption d'un tel matériau.



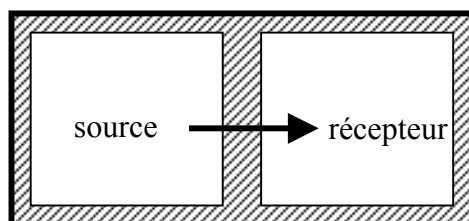
- **Les résonateurs mécaniques** (résonateurs à diaphragme, panneaux fléchissant). Ce sont généralement des plaques de bois (caractérisées par leur masse surfacique m) placées à une certaine distance d du mur. L'onde sonore qui frappe le panneau de bois cause la mise en vibration du système formé par ce panneau et la masse de l'air compris entre le panneau et le mur. Cette mise en vibration s'accompagne d'une dissipation interne de l'énergie. La fréquence de résonance est donnée approximativement par l'expression : $f_0 = \frac{60}{\sqrt{m * d}}$. Ce type d'absorbant est efficace aux basses fréquences.

g) Isolation sonore

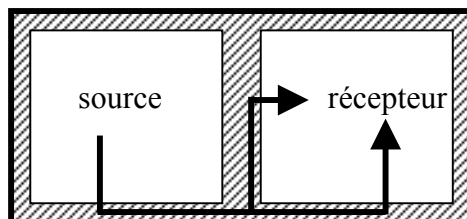
Nous allons maintenant nous intéresser à la propagation du son dans les parois séparant deux salles (transmission solidienne). La source et le récepteur seront donc contrairement à précédemment situés dans deux salles distinctes.

Le son transmis par un solide peut être dû à un contact mécanique sur ce solide (exemple : coup de marteau sur un mur qui s'entend dans tout l'immeuble), ou plus simplement à une onde sonore qui frappe le solide et qui est transmise par celui-ci. En acoustique du bâtiment on définit deux types de transmissions entre deux pièces :

- La transmission directe



- La transmission indirecte (ou latérale)



Pour caractériser l'atténuation du son due aux parois, on définit tout d'abord l'**isolement acoustique brut D_b** .

Soit une source S placée dans une salle 1 produisant un champ réverbéré de niveau L_{p1} et un récepteur R placé dans une salle 2 mesurant un champ réverbéré L_{p2} , l'isolement acoustique brut D_b est alors donné par : $D_b = L_{p1} - L_{p2}$. Il prend en compte l'ensemble des transmissions par les parois (directe et indirecte).

Le problème avec ce paramètre D_b , c'est qu'il caractérise autant la transmission par les parois que l'absorption du local 2 (on peut s'arranger pour que le niveau L_{p1} soit indépendant de l'absorption du local 1 en modifiant le niveau de la source). Pour éliminer la dépendance vis à vis de l'absorption du local 2, on définit un **isolement acoustique normalisé D_n** soit par :

$$D_n = L_1 - L_2 + 10 * \log \frac{TR_2}{TR_{ref}}$$

où TR_2 est le temps de réverbération du local 2 et TR_{ref} est un TR de référence, soit par $D_n = L_1 - L_2 + 10 * \log \frac{A_{ref}}{A_2}$, où A_2 est l'aire d'absorption équivalente du local 2 et A_{ref} est une aire d'absorption équivalente de référence.

En France la normalisation est effectuée en prenant en compte le temps de réverbération TR. (Traditionnellement $TR_{ref} = 0.5$ s est considéré comme un TR moyen en habitation.)

NB : L'isolement acoustique brut ou normalisé est souvent donné en bande d'octave car le TR de la salle 2 dépend généralement fortement de la fréquence.

Comme nous l'avons vu précédemment, les 2 paramètres définis ci dessus prennent en compte les transmissions directes et indirectes.

Quand on s'intéresse uniquement à la transmission directe, on définit l'**indice d'affaiblissement acoustique R de la paroi** par la relation $R = 10 * \log \left(\frac{1}{\tau} \right)$ où τ (dénommé **facteur de transmission de la paroi**) est le rapport entre la puissance $W_{transmise}$ du son transmis par la paroi et la puissance incidente $W_{incidente}$. La relation inverse donnant τ en fonction de R est : $\tau = 10^{\frac{-R}{10}}$

NB : Si les transmissions indirectes peuvent être négligées et si la paroi est suffisamment loin de la source pour être uniquement soumise au champ réverbéré de pression $p_{eff}^2 = 4\rho c * I_{eff}^{rev1}$ on peut facilement trouver la relation entre l'indice d'affaiblissement acoustique R et l'isolement normalisé D_n :

L'intensité I_1 incidente multipliée par la surface S de la paroi donne la puissance totale incidente $W_{incidente}$: $W_{incidente} = I_1 * S$.

La paroi agit vis à vis du local 2 comme une source acoustique de puissance acoustique $W_{transmise}$. On a vu précédemment (3-d) la relation entre puissance acoustique efficace et pression efficace du champ réverbéré : $p_{eff}^2 = \rho c * \left(\frac{4 * W_{eff}}{A} \right)$. Dans la salle 2, on a donc

$$p_{eff}^2 = \rho c * \left(\frac{4 * W_{transmise}}{A} \right) = \rho c * \left(\frac{4 * \tau * W_{incidente}}{A} \right) = \rho c * \left(\frac{4 * \tau * I_1 * S}{A} \right) \quad \text{et} \quad \text{donc}$$

$$L_{p2} = 10 * \log \left(\frac{\rho c * 4 * \tau * I_1 * S}{A * p_0^2} \right) = 10 * \log \left(\frac{4 * I_1}{I_0} \right) + 10 * \log(\tau) + 10 * \log \left(\frac{S}{A} \right) = L_1 - R + 10 * \log \left(\frac{S}{A} \right)$$

Finalemnt l'isolement brut D_b est relié à l'indice d'affaiblissement acoustique R par la

relation : $D = R - 10 * \log\left(\frac{S}{A}\right) = R + 10 * \log\left(\frac{A}{S}\right)$

Si la paroi est composée de matériaux hétérogènes de surface S_i (ex : mur de brique et porte en bois) dont on connaît séparément les indices d'affaiblissement acoustiques R_i , (et donc les facteurs de transmission τ_i) on calcule l'indice d'affaiblissement acoustique global grâce à la relation :

$$R = 10 * \log \left(\frac{\sum_i S_i}{\sum_i (S_i \tau_i)} \right) \text{ ce qui revient à } R = 10 * \log \left(\frac{\sum_i S_i}{\sum_i S_i 10^{-\frac{R_i}{10}}} \right)$$

Annexe :

A-Fiche récapitulative des notions abordées :

– Absorption :

- **Facteur d'absorption α d'une surface:** Fraction de la puissance acoustique qui est absorbée par cette surface. $\alpha = \frac{\text{Puissance}_{\text{absorbée}}}{\text{Puissance}_{\text{incidente}}}$ (α est souvent donné en bandes d'octaves)
- **Aire d'absorption équivalente A d'un local (en m^2):** Aire de la paroi d'un matériau complètement absorbant ayant la même absorption acoustique que le local considéré. Elle est reliée aux différentes surfaces S_i constituant le local (de facteur d'absorption α_i) par la relation : $A = \sum_i \alpha_i S_i$

– Champ direct /champ réverbéré :

- **Champ direct :** C'est le son qui provient directement d'une source acoustique sans avoir subi de multiples réflexions. Il est caractérisé par une pression :
$$p_{\text{eff dir}}^2 = \rho c * \frac{W_{\text{eff}} Q}{4\pi r^2}$$
 où W_{eff} est la puissance acoustique efficace de la source, Q est le facteur de directivité de la source.
- **Champ réverbéré :** C'est le champ acoustique dû à la superposition d'ondes acoustiques ayant été réfléchies un grand nombre de fois par les parois d'un local. Il est caractérisé par une pression uniforme dans la salle : $p_{\text{eff rev}}^2 = \rho c * \frac{W_{\text{eff}} * 4}{A}$.

– **Décibels (dB):** Unité sans dimension utilisée pour exprimer sous forme logarithmique le rapport de deux quantités (généralement des puissances électriques, acoustiques etc.)

– **Directivité (facteur de) :** rapport de l'intensité rayonnée par une source dans une direction donnée avec l'intensité qui serait rayonnée dans la même direction par une source omnidirectionnelle de même puissance acoustique totale.

– **Fréquence (en Hz) :** Nombre de fois qu'une grandeur périodique se reproduit identiquement à elle-même pendant 1 seconde. C'est l'inverse de la période T . Elle est liée à la pulsation ω par la relation $f = \frac{\omega}{2\pi}$ et à la longueur d'onde λ par la relation

$$f = \frac{c}{\lambda} \text{ où } c \text{ est la célérité du son dans le milieu considéré.}$$

– **Intensité acoustique ($W.m^{-2}$)** L'intensité acoustique au point M à l'instant t est le flux d'énergie traversant l'unité de surface centrée sur M par unité de temps. Elle s'exprime en watts par mètres carrés.

- Pour une onde plane se propageant dans l'air, l'intensité acoustique efficace est reliée à la pression efficace par la relation : $I_{eff} = \frac{p_{eff}^2}{\rho c}$ où ρ est la masse volumique de l'air en kg/m^3 et c est la célérité du son dans l'air.
- Pour une superposition diffuse d'ondes planes (champ réverbéré), la relation entre intensité et pression devient : $I_{eff}^{rev} = \frac{P_{eff}^{rev}}{4 * \rho c}$.
- Niveau d'intensité acoustique: $L_I = 10 * \log\left(\frac{I_{eff}}{I_0}\right)$ où I_0 est l'intensité acoustique de référence égale à $10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$.
- En champ direct : $L_I^{dir} = L_p^{dir}$, en champ réverbéré $L_I^{rev} = L_p^{rev} - 6 \text{ dB}$.

– **Isolement acoustique (en dB) :**

- **Isolement brut (Db):** L'isolement brut d'un local 2 (de réception) vis à vis d'un local 1 (d'émission) est défini par la relation : $D_b = L_{p1}^{rev} - L_{p2}^{rev}$ où L_{p1}^{rev} et L_{p2}^{rev} sont les niveaux de pression en champ réverbérés dans les locaux 1 et 2.
- **Isolement normalisé (Dn):** On peut normaliser l'isolement acoustique par rapport au TR : $D_{nTR} = D_b + 10 * \log\left(\frac{TR_2}{TR_{ref}}\right)$, où TR_{ref} est un TR moyen de référence généralement égal à 0.5 s. On peut aussi normaliser l'isolement acoustique par rapport à l'aire d'absorption équivalente A : $D_{nA} = D_b + 10 * \log\left(\frac{A_{ref}}{A_2}\right)$ où A_{ref} est généralement égale à 10 m^2 .

– **Niveaux :**

- **Niveau d'intensité :** $L_I = 10 \log\left(\frac{I_{eff}}{I_0}\right)$ où $I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$.
- **Niveau de puissance :** $L_W = 10 \log\left(\frac{W_{eff}}{W_0}\right)$ où $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$.
- **Niveau de pression :** $L_p = 10 \log\left(\frac{P_{eff}^2}{p_0^2}\right) = 20 \log\left(\frac{P_{eff}}{p_0}\right)$ où $p_0 = 2 * 10^{-5} \text{ Pa}$
- **Niveau équivalent L_{eq} : moyenne pendant une durée donnée T du niveau de pression.** $Leq_T = 10 \log\left(\frac{1}{T} \int_T 10^{\frac{L_p(t)}{10}} dt\right)$ (en dB ou dB(A))
- **Niveau d'exposition sonore quotidienne : L_{ESQ}** $L_{ESQ} = Leq_T + 10 \log\left(\frac{T}{T_0}\right)$ (en dB(A)) où T est la durée pendant laquelle le niveau de pression est

supérieur à 85 dB(A) et T_0 est la durée quotidienne moyenne de travail: 8 heures (28800 s). **Loi du 28/04/88 : L_{ESQ} doit être inférieur à 85 dB(A)**

- **Octave (une):** Intervalle entre deux signaux dont le rapport des fréquences est 2.
- **Pondération :** Prise en compte de la sensibilité variable de l'oreille (en fonction de la fréquence et du niveau sonore). La pondération des niveaux sonores permet de définir une unité (le dB(A) principalement) donnant un niveau d'intensité perçue. Elle est donnée généralement en coefficients en dB par bande d'octave ($Pond_{63}$, $Pond_{125}$, $Pond_{250}$...). Si un son est défini par ses niveaux par bandes d'octave Lp_{63} , Lp_{125} , Lp_{250} , Lp_{500} . Alors le niveau global pondéré est donné par

$$L_p(\text{dB(A)}) = 10 * \log(10^{\frac{Lp_{63} - Pond_{63}}{10}} + 10^{\frac{Lp_{125} - Pond_{125}}{10}} + 10^{\frac{Lp_{250} - Pond_{250}}{10}} + \dots)$$

- **Pression acoustique (en Pa):**
 - **instantanée :** Au point M et à l'instant t, la pression acoustique instantanée est la différence entre la pression totale et la pression statique moyenne (généralement P_{atm})

- **efficace :** $p_{\text{eff}}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} p^2(t') dt'}$ (où T est la durée sur laquelle est effectuée

l'intégration. Si le signal est périodique on prend en général T égal à la période du signal.)

- **de référence :** $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa. C'est la pression efficace minimum audible pour un son pur de fréquence 1000 Hz.
- **Salle réverbérante:** Salle destinée aux mesures d'absorption d'un matériau donné présentant une aire d'absorption équivalente petite et donc une durée de réverbération longue.
- **Salle sourde (anéchoïque):** Salle dont les parois sont rendues aussi absorbantes que possible pour limiter le champ réverbéré. L'aire d'absorption équivalente est donc grande et le TR petit.
- **Sonomètre:** Appareil de mesure de niveaux sonores contenant un microphone et un système de traitement permettant de donner des niveaux de bruits par bandes d'octave, pondérés etc...

- **Superposition:**
 - de sources : Soient n sources générant isolément un niveau de pression Lp_i . Le niveau total (si les sources sont décorrélées) est alors :

$$L_p = 10 * \log(10^{\frac{Lp_1}{10}} + 10^{\frac{Lp_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{Lp_n}{10}})$$

- de niveaux par bandes d'octave : Si un son est défini par ses niveaux par bandes d'octave L_{p63} , L_{p125} , L_{p250} , L_{p500} . Alors le niveau global est donné par

$$L_p = 10 * \log(10^{\frac{L_{p63}}{10}} + 10^{\frac{L_{p125}}{10}} + 10^{\frac{L_{p250}}{10}} + \dots)$$

- **Temps de Réverbération (TR)** : Durée au bout de laquelle le signal sonore a baissé de 60 dB après l'interruption de la source sonore. Le TR est relié au volume V et à l'aire d'absorption équivalente A de la salle par la loi de Sabine : $TR = 0.16 * \frac{V}{A}$

- **Transmission du son par une paroi:**

- **facteur de transmission τ d'une paroi** : c'est le rapport entre la puissance transmise par la paroi et la puissance incidente. $\tau = \frac{\text{Puissance}_{\text{transmise}}}{\text{Puissance}_{\text{incidente}}}$

(souvent donné en bandes d'octave)

- **Indice d'affaiblissement R d'une paroi**: $R = 10 * \log(\frac{1}{\tau})$

- **Indice d'affaiblissement composite** : L'indice d'affaiblissement d'une paroi de surface S contenant N sous-parois de surface S_i est donné par :

$$R = 10 * \log\left(\frac{S}{\sum_{i=1}^N S_i * 10^{\frac{R_i}{10}}}\right)$$

B-Obtention de l'équation d'onde acoustique:

Les équations caractéristiques de l'acoustique (et de la mécanique voire de la physique en général) sont obtenues à partir de principes généraux de conservation. Un principe de conservation s'exprime schématiquement comme ceci. Soit un volume V et une quantité A qui se conserve au cours du temps (on suppose que les sources créant cette quantité A ne sont pas à l'intérieur du volume V). Alors la variation par unité de temps de la quantité A dans le volume V s'exprime simplement comme le flux de cette quantité à travers la surface S délimitant le volume V (en gros, « ce qui rentre » moins « ce qui sort »).

Les équations générales de l'acoustiques sont au nombre de 3. Elles sont basées sur les principes de conservation de la **masse**, de l'**impulsion** (ou **moment**), et de l'**énergie**.

- La conservation de la masse stipule qu'à l'intérieur d'un volume V donné, la variation de masse au cours du temps est liée au transfert (flux) de cette masse à travers la surface du volume : $\frac{\partial M}{\partial t} = -\iint_S \rho \underline{v} \cdot \underline{n} dS$ (où $\rho \underline{v} \cdot \underline{n} dS$ est la quantité de masse qui traverse l'élément de surface dS pendant le temps dt (\underline{n} est un vecteur unitaire normal à la surface et orienté vers l'**extérieur** du volume, ce qui explique le signe -) .

Une fois transformée cette relation donne la première équation constitutive de l'acoustique (équation de continuité ou équation de conservation de la masse):

$$\boxed{\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\text{div}(\rho \underline{v})} \quad (1)$$

- La conservation du moment (ou 1^{er} principe de Newton, ou principe fondamental de la dynamique) dit que la force appliquée à un volume V de masse ρV est égale à l'accélération du volume V multiplié par sa masse.

Par exemple, prenons un tube long de surface S dans lequel nous considérons un élément de volume $dV = S \cdot dX$, de masse $\rho \cdot dV$. Le principe de Newton appliqué à cet élément de volume donne :

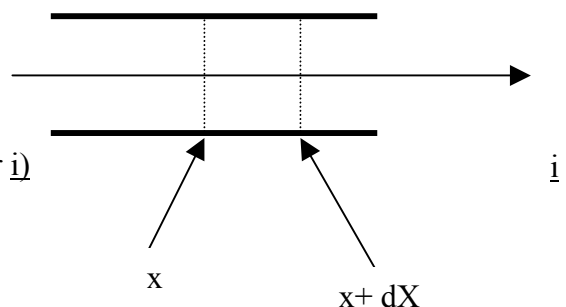
$$\underline{F} \text{ (extérieures)} = -(P(x+dX) \cdot S - P(x) \cdot S) \cdot \underline{i}$$

(on néglige l'influence de la force de gravité)

d'où la relation de Newton (projetée sur le vecteur \underline{i})

$$\rho S dX \cdot \frac{dv}{dt} = -S \cdot \frac{dP}{dX} dX$$

$$\text{Ce qui donne une fois simplifié : } \rho \cdot \frac{dv}{dt} = -\frac{dP}{dX}$$



Cette équation (équation d'Euler) qui traduit donc le principe fondamental de la dynamique fournit la relation entre pression et vitesse. Dans le cas général (3D) on obtient :

$$\boxed{\rho \frac{dv}{dt} = -\text{grad}(p)} \quad (2)$$

- La troisième équation constitutive de l'acoustique est une relation thermodynamique caractérisant la conservation de l'énergie. Nous avons vu que l'on peut exprimer l'état du fluide par 2 variables. Toute autre variable dépend alors des deux variables choisies. Par exemple l'entropie s dépend de la pression p et de la densité ρ : $s = s(p, \rho)$. Si on différencie cette expression on obtient :

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_\rho dp + \left(\frac{\partial s}{\partial \rho}\right)_p d\rho$$

Au cours de la compression (échauffement) et de la dilatation (refroidissement) du gaz, on suppose en première approximation que le temps nécessaire à l'échange thermique entre zone chaude et froide est plus grand que la fréquence d'oscillation, c'est à dire que cet échange thermique n'a pas le temps de ce faire. On considère alors que le mouvement est **adiabatique** (pas d'échange de chaleur au cours du temps) donc que l'entropie du gaz reste constante lors de l'oscillation. C'est à dire $ds = 0$ donc :

$$\boxed{\left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_\rho dp = -\left(\frac{\partial s}{\partial \rho}\right)_p d\rho} \quad (3)$$

Cette relation donne donc la dépendance entre pression et densité.

Les trois relations que nous avons vues donnent donc les relations entre les différentes variables décrivant le milieu de propagation. Cependant une hypothèse supplémentaire doit être faite pour aboutir aux équations classiques de l'acoustique, c'est celle des «petites amplitudes d'oscillation» qui permet de linéariser les équations précédentes (Il suffit de considérer une amplitude même très forte de pression acoustique dans l'air eg : 10 Pa, par rapport à la pression atmosphérique de 100 000 Pa. Le rapport vaut donc 0.0001 et peut être raisonnablement considéré comme petit.)

Exemple de linéarisation : $(1+\varepsilon)^2$ où ε est petit par rapport à 1 peut être développé en $1+2\varepsilon +\varepsilon^2$. On néglige alors le terme ε^2 puisque il est plus petit que le terme en ε . On obtient donc $(1+\varepsilon)^2 \approx 1+2\varepsilon$ qui est une forme linéarisée de $(1+\varepsilon)^2$

Une fois linéarisées les équations précédentes deviennent :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_0 \operatorname{div}(\underline{v}) \quad (4) \\ \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \operatorname{grad}(p) \quad (5) \\ p = c_0^2 \rho \text{ où } c_0 = c_0 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s \quad (6) \end{array} \right.$$

NB : C'est parce que les équations de l'acoustique sont linéaires que l'on peut dire que la pression acoustique résultant de plusieurs sources est égale à la somme des pressions acoustiques de chaque source prise isolément.

Si maintenant on dérive l'équation (4) par rapport au temps, on obtient :

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = -\rho_0 \frac{\partial}{\partial t} (\operatorname{div}(\underline{v}))$$

Si on applique l'opérateur divergence à l'équation (5) et que l'on multiplie chaque membre par ρ_0 :

$$\rho_0 \operatorname{div} \left(\frac{\partial \underline{v}}{\partial t} \right) = -\operatorname{div}(\operatorname{grad}(p)) = -\Delta p$$

On soustrait alors ces 2 équations pour obtenir : $\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = \Delta p$. On utilise alors l'équation (6)

donnant la relation entre p et ρ pour obtenir la fameuse équation d'onde : $\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \Delta p$

C- Les microphones

Un microphone est un transducteur qui transforme une variation de pression acoustique en variation de tension électrique. On distingue au cours de cette transformation deux étapes (simultanées) :

- La transduction Acoustique \longrightarrow Mécanique
- La transduction Mécanique \longrightarrow Electrique.

La partie mécanique correspond schématiquement à la vibration d'une membrane (reliée éventuellement à un équipement mobile: bobine etc...).

On peut classer les microphones en fonction du type de transduction considéré. Dans le premier cas on parle de classification acoustique, dans le second cas de classification électrique.

1. Classification acoustique.

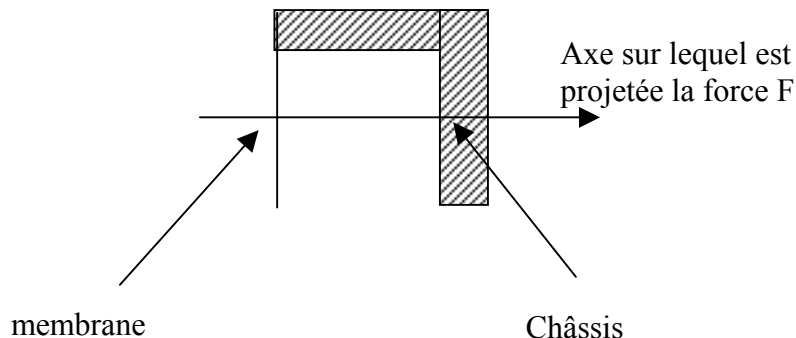
Quand on classe les micros selon leur propriétés acoustiques, on considère plus particulièrement la directivité des microphones. On distingue généralement :

- Les microphones à pression
- Les microphones à gradient de pression
- Les microphones mixtes



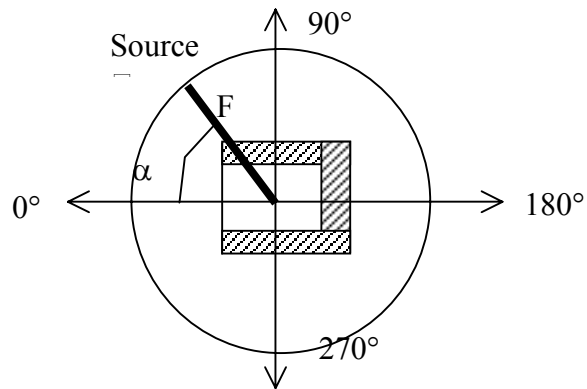
a) Principe des microphones à pression

Les microphones à pression sont les microphones les plus simples à considérer. Ils consistent simplement en une membrane mobile placée sur un châssis rigide :

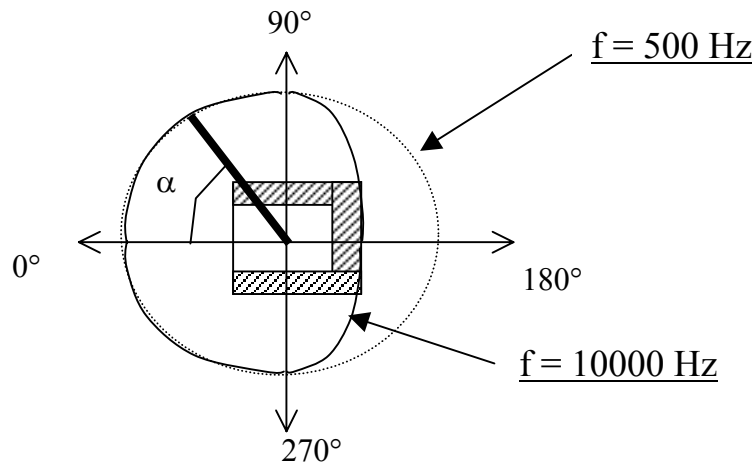


L'onde acoustique incidente de pression p exerce une force F sur la membrane. Dans le cas idéal, cette force est la même quelque soit la direction de la source (la pression est une quantité scalaire qui n'a pas de direction privilégiée). En projection sur l'axe perpendiculaire à la membrane et orienté dans le sens rentrant on a $F = p \cdot S$.

On parle alors de capteur omnidirectionnel (comme on parle de source omnidirectionnelle). Pour visualiser la directivité du capteur on peut définir un diagramme polaire qui représente la force F mesurée par le capteur en fonction de l'angle α entre la source acoustique et l'axe perpendiculaire à la membrane :

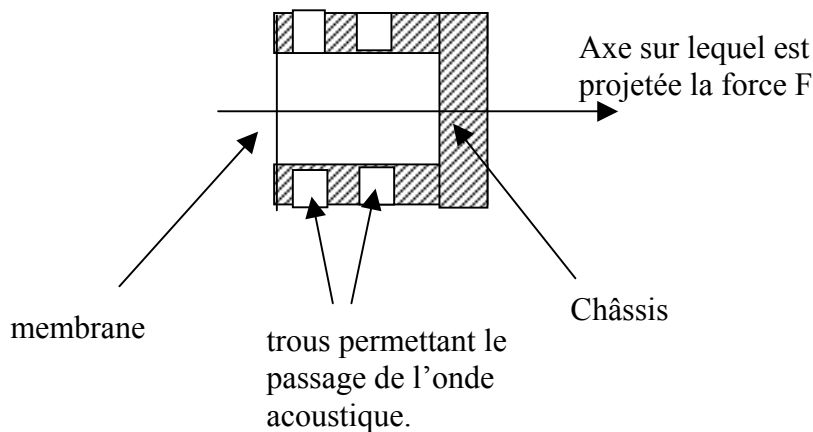


Dans un cas réel le capteur influe sur la mesure de pression du fait des réflexions d'ondes acoustiques sur le châssis. Cette influence se fait principalement sentir pour des fréquences correspondant à des longueurs d'ondes similaires à la taille du microphone (Pour un micro de 5 cm la fréquence correspondante est 7000 Hz.) Le diagramme polaire n'est alors plus omnidirectionnel.



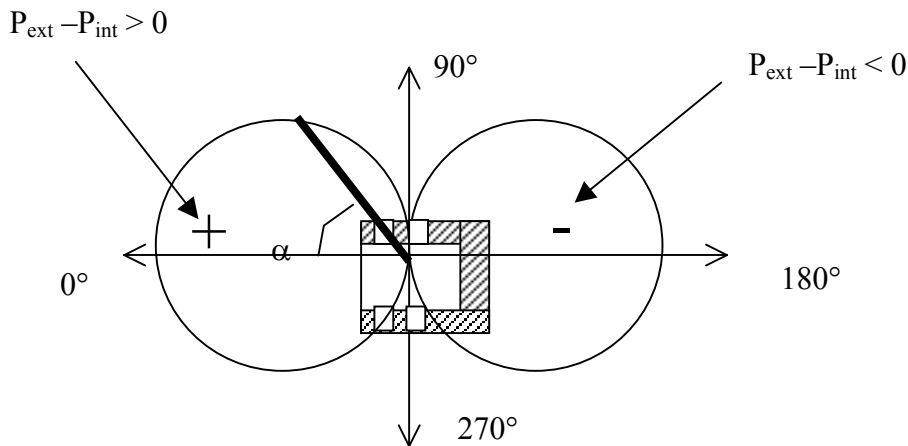
b) Principe des microphones à gradient de pression.

Dans un microphone à gradient de pression l'onde acoustique peut atteindre les deux côtés de la membrane. Voici un schéma simplifié de ce type de micro.



Si on distingue maintenant la pression acoustique au niveau de la membrane à l'extérieur (p_{ext}) et à l'intérieur (p_{int}) du microphone, on peut exprimer la force totale s'exerçant sur la membrane (en projection sur le même axe que précédemment) : $F = (P_{ext} - P_{int}) * S$

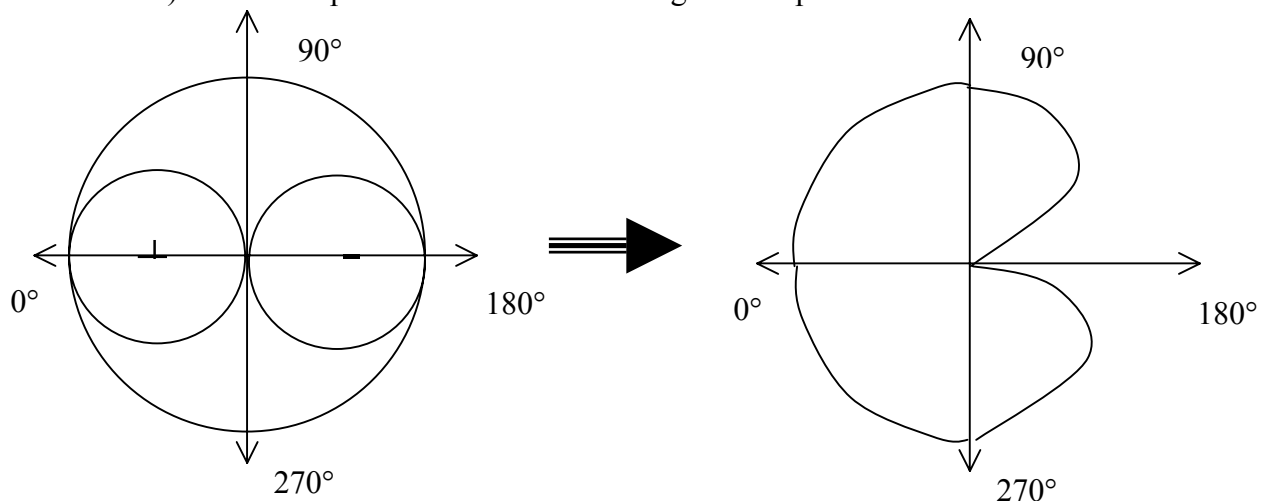
La différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur est due à la différence de trajet parcouru par l'onde sonore. Quand la source sonore est dans l'axe du microphone cette différence de pression est maximum (en valeur absolue). Quand la source est dans un plan perpendiculaire à l'axe du microphone, la différence de pression est nulle (le trajet pour atteindre les 2 faces de la membrane est le même). Le diagramme polaire de ce type de microphone est le suivant :



On parle de microphone bi-directionnel.

c) Principe des microphones mixtes.

Si on associe un microphone à pression et un microphone à gradient de pression on peut obtenir de nouveaux diagramme de directivité. En particulier la directivité cardioïde (en forme de cœur) est donnée par la somme des deux diagrammes précédents

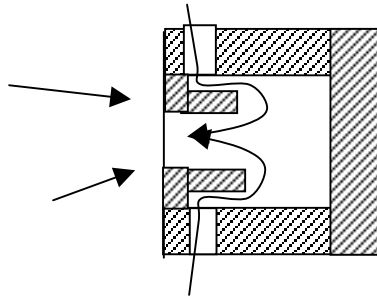


Directivité omni + directivité bi



Directivité cardioïde

Cette sommation peut s'effectuer électriquement à partir de deux microphones distincts, ou acoustiquement en utilisant le principe de « labyrinthe acoustique ».



La forme du labyrinthe permet de jouer sur le temps de parcours et donc sur la directivité du capteur.

2) Classification électrique

a) Microphones électrodynamiques

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
Intérêt	Solide, pas très cher	Ruban léger donc bonne réponse dynamique

Inconvénient	Système masse+bobine lourd donc moins bonne réponse dynamique	Fragile, plus cher.
--------------	---	---------------------

b) Microphones électrostatiques

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 pré-amplificateur. (Voir schéma).

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...)

3) Caractéristiques générales d'un microphone

- Sensibilité **S**: C'est le rapport entre la tension de sortie efficace et la pression acoustique incidente efficace. La sensibilité s'exprime en volts par pascals (V/Pa) ou en dB en prenant pour référence une sensibilité $S_0 = 1 \text{ V/Pa}$
- Bruit de fond **bf** (en dB): 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

$$L_{\text{bf}} = 20 \log\left(\frac{U_{\text{bf}}}{S * p_0}\right) \text{ où } p_0 \text{ est la pression acoustique de référence } (2.10^{-5} \text{ Pa})$$

- Rapport signal/bruit : **rsb** (en dB): 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, si le micro a une sensibilité

$S = 30 \text{ mV/Pa}$. 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 $U_{\text{br}} = S * p_0 * 10^{\frac{L_{\text{br}}}{20}} = 10^{-5} \text{ V}$. D'où $\text{rsb} = 69.5 \text{ dB}$

- 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%.
- Dynamique (en dB): c'est la différence entre le niveau maximum admissible et le niveau de bruit de fond.
- Courbe de réponse: C'est une courbe représentant la sensibilité du microphone **en fonction de la fréquence**. Plus cette courbe est plate plus le signal enregistré a un équilibre spectral proche du signal d'origine.

Voici enfin un tableau donnant les ordres de grandeurs des différentes caractéristiques énumérées ci dessus pour les différents types de microphones cités précédemment.