IUT Belfort Montbéliard

Mesures Physiques

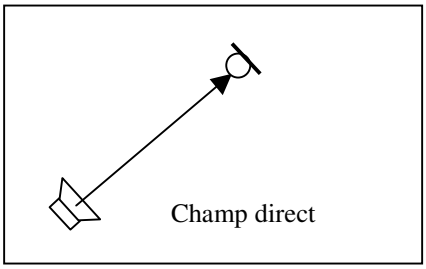
UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

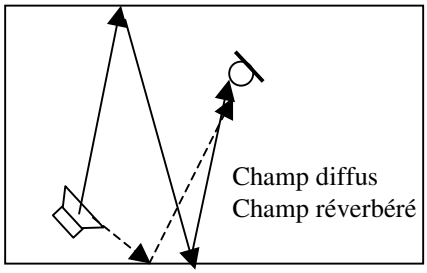
ACOUSTIQUE 2

Chapitre 1 – PHENOMENES PHYSIQUES EN ACOUSTIQUE ARCHITECTURALE

I – INTRODUCTION

Considérons une source sonore plus ou moins directionnelle.



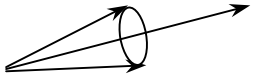


II - PROPAGATION EN CHAMP LIBRE

1°/ ENERGIE RECUE PAR UN RECEPTEUR

Une source est caractérisée par l'intensité acoustique qu'elle émet en W/m^2.

La source peut être omnidirectionnelle ou directionnelle.

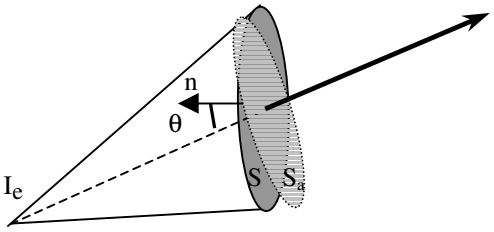


On peut utiliser l'intensité émise I_e dans la direction source récepteur pour caractériser la source.
I_e est donc l'intensité acoustique émise dans l'angle solide $\Omega = S/d^2$

Angle solide :

Considérons une source émettant dans un angle solide Ω.

I_c peut alors être caractérisée par un vecteur. (direction, sens et module).



La normale n fait un angle θ avec la direction de la propagation.
La surface apparente est :

La puissance $\mathcal{P}$ reçue par la surface S : $\mathcal{P} = I_e \cdot S_a \Leftrightarrow$ $\mathcal{P} =$

Le récepteur reçoit le maximum de puissance quand il est perpendiculaire à la direction de propagation.

2°/ GRANDEURS ACOUSTIQUES

Compte tenu des propriétés de l'oreille, on utilise les grandeurs acoustiques chiffrées en dB.

Niveau d'intensité sonore (SL) :

Niveau de pression sonore (SPL) :

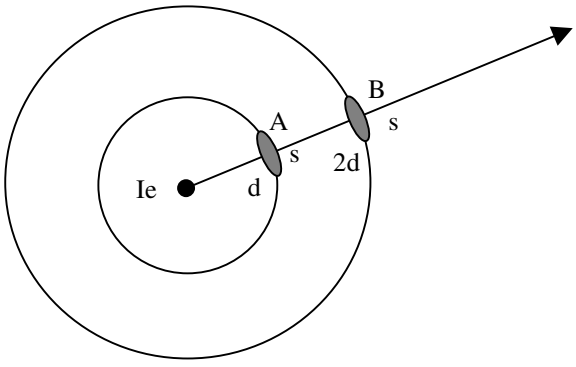
On a :

Niveau de puissance sonore :

3°/ APPLICATIONS

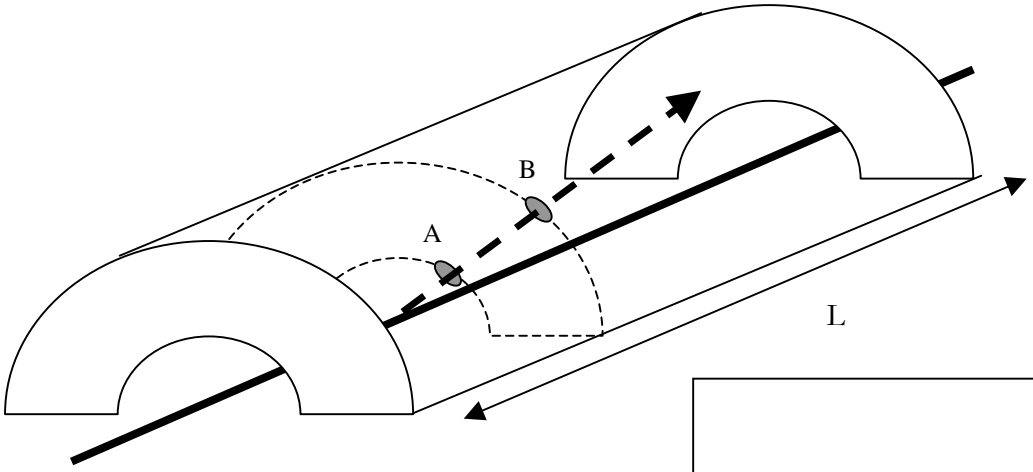
a) Exercice 1

Montrer en champ libre une source ponctuelle voit son niveau d'intensité sonore et de pression sonore (SPL) décroître de 6 dB avec le doublement de la distance.



b) Exercice 2

Montrer en champ libre une source linéique voit son niveau de pression sonore (SPL) décroître de 3 dB avec le doublement de la distance.

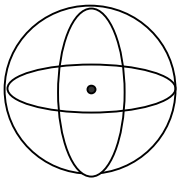


III – SOURCE PROCHE D'UNE PAROI

On considère toujours une propagation en champ libre mais la source est proche d'une paroi.

On cherche une relation entre le niveau de puissance sonore et le niveau de pression sonore.

- **Source omnidirectionnelle émettant une puissance** $\mathcal{P}_e$ dans 4π sr.



Intensité acoustique émise : I_e = => $4\pi d^2$: *surface sphère*

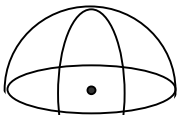
$L_i = 10 \log (I_e / I_0) =$

$=$

$L_i =$

Div par 2

- **Source omnidirectionnelle émettant une puissance** $\mathcal{P}_e$ dans 2π sr.



Intensité acoustique émise : I_e = =>$2\pi d^2$: *surface ½ sphère*

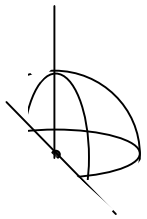
$L_i = 10 \log (I_e / I_0) =$

$=$

$L_i =$

Div par 2

- **Source omnidirectionnelle émettant une puissance** $\mathcal{P}_e$ dans π sr.



Intensité acoustique émise : I_e = => πd^2 : *surface ¼ sphère*

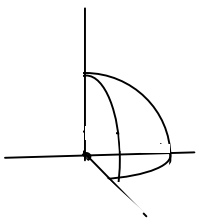
$L_i = 10 \log (I_e / I_0) =$

$=$

$L_i =$

Div par 2

- **Source omnidirectionnelle émettant une puissance** $\mathcal{P}_e$ dans $\pi/2$ sr.



Intensité acoustique émise : I_e = => $\pi d^2 / 2$: *surface ¼ sphère*

$L_i = 10 \log (I_e / I_0) =$

$=$

$L_i =$

En conclusion : L_i =

Q : facteur de correction dans le cas de source sonores non omnidirectionnelles correspondant au coefficient de division de l'angle solide 4π sr.

Attention : Cette formule ne prend pas en compte les paramètres tels que l'humidité de l'air, la température, le vent et la constitution du sol. Elle n'est donc pas forcément applicable surtout lorsque d devient grande > 100 m.

Ainsi l'atténuation augmente si l'humidité de l'air diminue.
L'atténuation augmente avec la fréquence du signal sonore.

IV – CAS DES SOURCES NON ISOTROPES

Les sources considérées jusqu'à maintenant étaient isotropes : l'énergie acoustique est émise uniformément autour de la source.

De nombreuse sources ne suivent pas ce modèle : Un haut parleur privilégie la direction correspondant à l'axe de la bobine. On dit alors que la source est directive.

1°/ FACTEUR DE DIRECTIVITE

Considérons une source directive émettant une puissance $\mathcal{P}_e$

Soit I_a l'intensité de la source dans la direction d'observation.

Soit I_i l'intensité que donnerait la source isotrope de même puissance à la même distance.

I_i est forcément plus faible que I_a …

Le facteur de directivité est définit par : $Q = I_a / I_i$

Remarques :

2°/ EXPRESSION DE Lp

Soit une source de puissance P.

Si la source était isotrope, à la distance d, l'intensité est : $Ii = P / 4 \pi d^2$

On a donc : $Ia = Q\ Ii = Q\ P / 4 \pi d^2$

Le niveau de puissance sonore est donc :

$Lp = 10 \log I_a/I_0 = 10 \log Q + 10 \log I_i /I_0 \Leftrightarrow$

L'indice de directivité est défini par $D = 10 \log Q$ et s'exprime en dB

Remarque :

- Source émettant sur les côtés : $Q < 1 \Rightarrow D < 0$
- Source directive : $Q > 1 \Rightarrow D > 0$
- Plus la source est directive plus D est grand.

3°/ DIRECTIVITE DES INSTRUMENTS DE MUSIQUE

Tableau donnant le facteur de directivité d'instruments de musique
Certains instruments sont omnidirectionnels à 500 Hz (Violon, Hautbois, Clarinette et trompette.
Dans les fréquences plus élevées (sons aigus) les instruments deviennent plus directifs. Il vaut alors mieux être dans l'axe.

F (Hz)	500	1000	3000
λ (cm)	70	34	11
Violon	1	2	2
Flûte	1,5	1,5	1,5
Hautbois	1	1,5	2
Clarinette	1	2	2
Violoncelle	2	2	2,5
Trompette	1	2	4,5
Tuba	2	4,5	6,5

On remarque que les petits instruments sont moins directifs, ceci est lié au phénomène de diffraction.

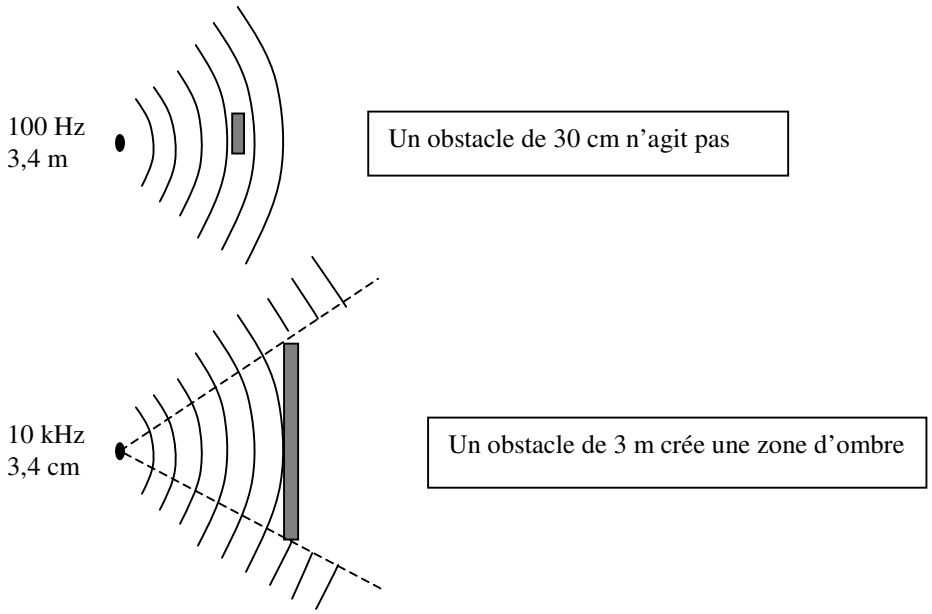
V – OMBRE ACOUSTIQUE

Ce phénomène est perceptible lorsque les dimensions de l'obstacle sont grandes par rapport à la longueur d'onde de l'onde sonore émise.

Rappel : $c = 340$ m/s pour : $20 \text{ Hz} < f < 20 \text{ kHz}$

$$\lambda = c/f \Rightarrow 17 \text{ m} < \lambda < 1{,}7 \text{ cm}$$

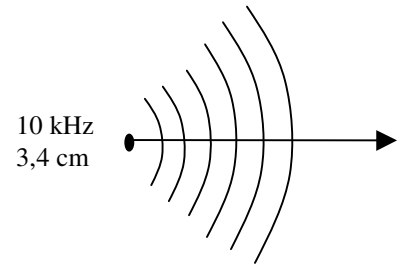
Exemple :



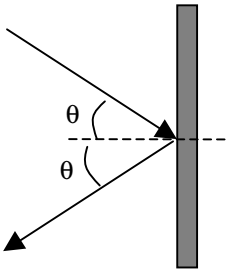
VI – REFLEXI ON

Phénomène également perceptible quand les dimensions de l'obstacle sont grandes par rapport à la longueur d'onde de l'onde sonore émise.

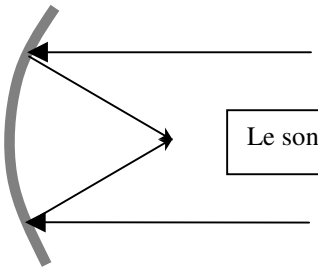
Comme en optique géométrique le rayon acoustique correspond à la direction de la propagation et est perpendiculaire en chaque point aux surfaces d'ondes.



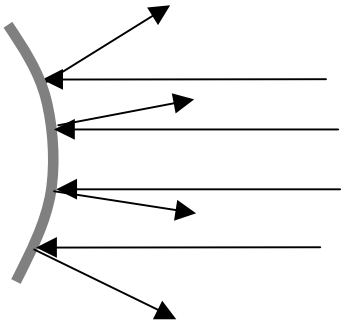
Rayon acoustique dans une direction donnée



L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.



Le son converge au foyer

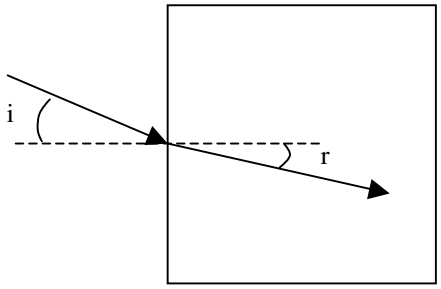


Le son diverge dans toutes les directions

VII – REFRACTION

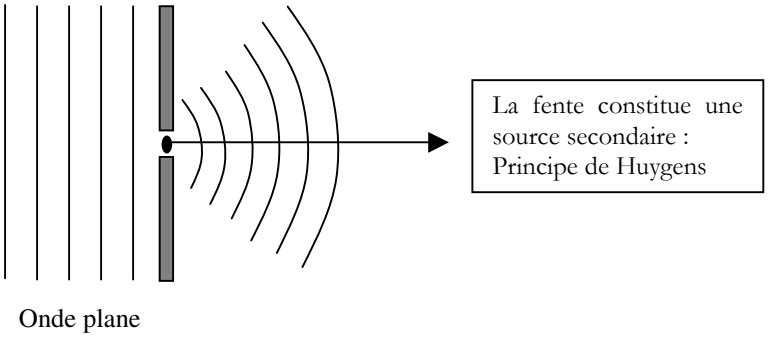
Ce phénomène correspond au changement de la direction de propagation d'une onde acoustique lors de sa transmission à l'occasion d'un changement de milieu.

Comme en optique où n = c/v : plus la vitesse dans le milieu est faible, plus l'indice est grand (milieu plus dense).



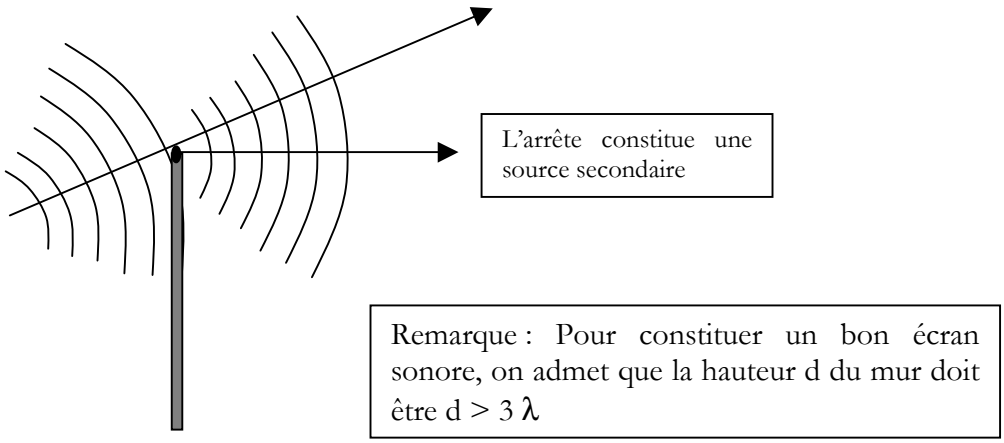
VIII – DIFFRACTION

Ce phénomène apparaît au passage d'une onde dans une fente ou sur une arrête.



Ce phénomène n'apparaît que si d << λ ***d : largeur de la fente***
λ : longueur d'onde

Or λ = c/f => Pour d donné ce phénomène concerne davantage les basses fréquences.



IX – DIFFUSION

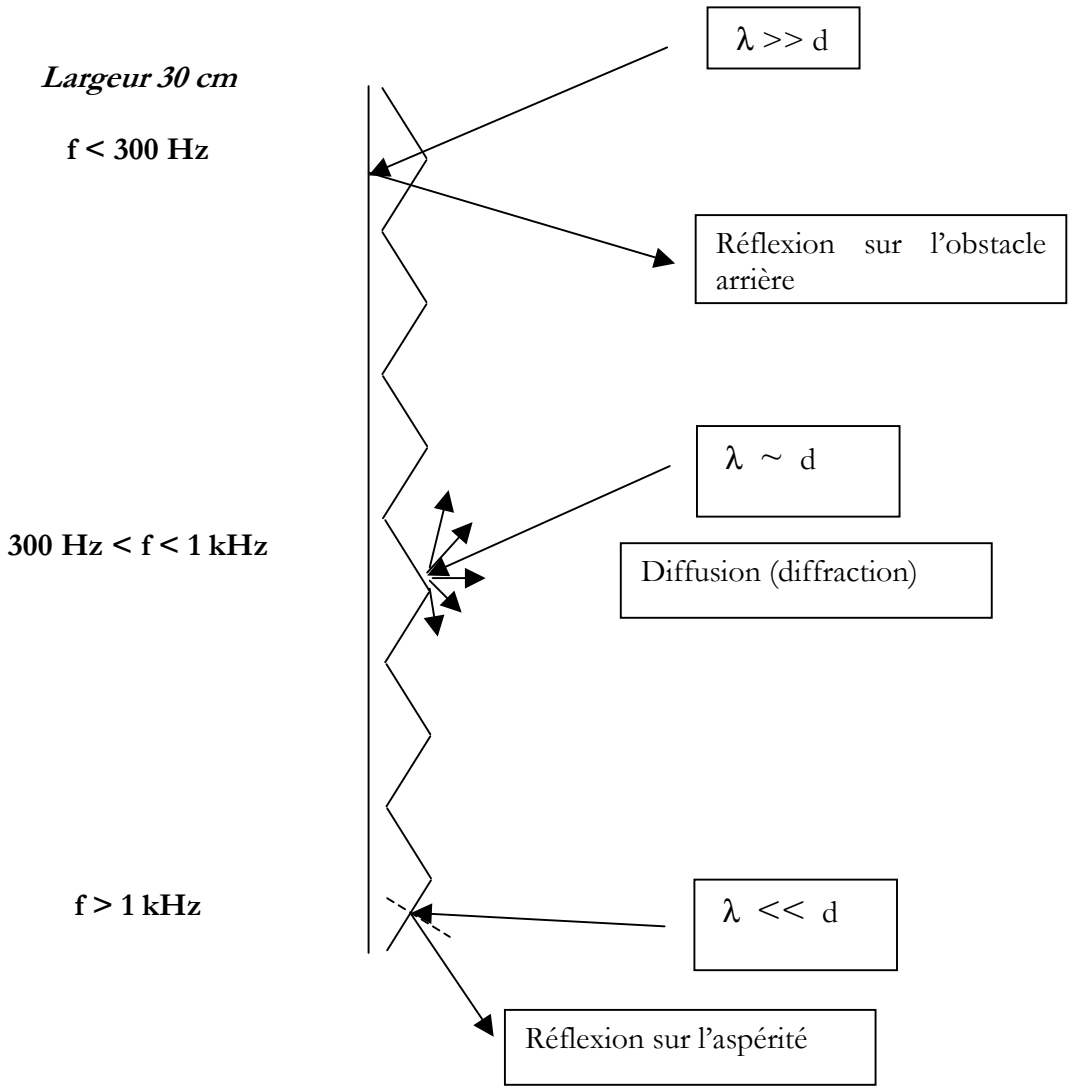
En optique, un objet éclairé par une source lumineuse est visible depuis n'importe quelle direction à cause des aspérités de la surface qui produisent des phénomènes de diffraction.

Ce phénomène apparaît aussi en acoustique si les défauts de la surface sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde.

En résumé :

Considérons un matériaux constitué d'une surface plane et d'une aspérité de largeur 30 cm.

Selon la longueur d'onde incidente arrivant sur la surface irrégulière, quel phénomène se produit-il ?



Chapitre 2 – CHANGEMENT DE MILIEU MATERIEL

I – RAPPEL

Impédance acoustique :

P : pression acoustique V : vitesse déplacement molécules
ρ_0 : masse volumique c : vitesse de l'onde
χ_s : coefficient de compressibilité isentropique

Dans le cas d'une onde progressive plane, l'impédance acoustique est constante et la même en tout point dans la direction de propagation.

L'impédance acoustique augmente quand la densité du milieu augmente
L'impédance acoustique augmente quand la compressibilité diminue

Pour une amplitude de pression P_m donnée, quand Z augmente, l'amplitude de la vitesse diminue.

L'impédance acoustique caractérise en quelque sorte l'aptitude du milieu à diminuer la vitesse pour une surpression donnée.

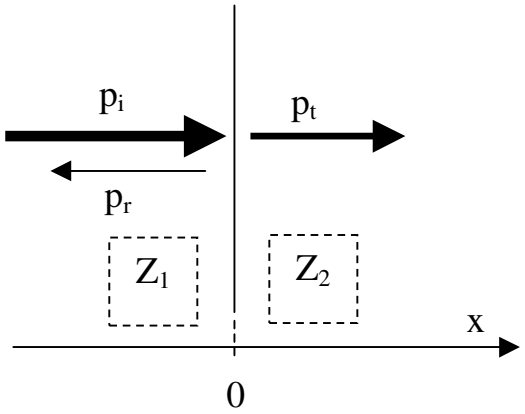
II – COEFFICIENT DE REFLEXION ET DE TRANSMISION

1°/ INCIDENCE PERPENDICULAIRE

Soit une surface plane de séparation entre 2 milieux d'impédance acoustique différente Z_1 et Z_2.

Considérons une onde perpendiculaire à la surface de séparation des é milieux.

Une partie de l'onde est transmise
une autre partie est réfléchie.



a) Equations de continuité à la surface de séparation :

$$\begin{cases} p_i(0,t) + p_r(0,t) = p_t(0,t) \\ v_i(0,t) + v_r(0,t) = v_t(0,t) \end{cases}$$

$$\begin{cases} p_i(0,t) + p_r(0,t) = p_t(0,t) \\ p_i(0,t)/Z_1 - p_r(0,t)\ /Z_1 = p_t(0,t)\ /Z_2 \end{cases}$$

Diviser par pi

$$\begin{cases} 1 + p_r(0,t)/p_i(0,t) = p_t(0,t)/p_i(0,t) \\ 1/Z_1 - p_r(0,t)\ /[\,p_i(0,t)\ Z_1] = p_t(0,t)\ /[\,p_i(0,t)\ Z_2\,] \end{cases}$$

b) Coefficients de réflexion et transmission

On définit :

Coefficient de réflexion

Coefficient de transmission :

Attention aux Notations :
Ne pas confondre
t coef de transmission et t temps

Ce qui donne :

$$\begin{cases} \\ \\ \end{cases}$$

On obtient finalement :

$r =$

$t =$

c) Coefficients de réflexion et transmission de la puissance

Il faut ici faire intervenir le carré de la pression acoustique,

Comme l'intensité acoustique I est donnée par : $I = P_{eff}^2/Z$, on peut définir les coefficients de réflexions en puissance comme le rapport des intensités acoustiques.

Coefficient de réflexion de la puissance : R =
Coefficient de transmission de la puissance : T =

Expressions en fonction des impédances :

$R = Ir / Ii = (P_r^2/Z_1) / (P_i^2/Z_1) = (P_r/P_i)^2 = r^2$

$\Leftrightarrow$ $R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}\right)^2$

$T = It / Ii = (P_t^2/Z_2)/(P_i^2/Z_1) = (P_t^2/P_i^2)(Z_1/Z_2) = 4 Z_2^2 Z_1 / [(Z_1 + Z_2)^2 Z_2]$

$\Leftrightarrow$ $T = \frac{4 Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$

Remarque : Attention $T \neq t^2$

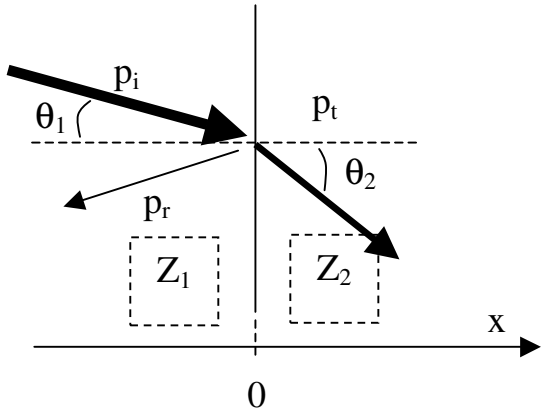
2°/ INCIDENCE QUELCONQUE

Soit une surface plane de séparation entre 2 milieux d'impédance acoustique différente Z_1 et Z_2.

Considérons une onde perpendiculaire à la surface de séparation des é milieux.

Une partie de l'onde est transmise
une autre partie est réfléchie.

L'angle d'incidence et de réflexion est θ



a) Equations de continuité à la surface de séparation :

$$\begin{cases} p_i(0,t) + p_r(0,t) = p_t(0,t) \\ v_i(0,t)\cos\theta_1 + v_r(0,t)\cos\theta_1 = v_t(0,t)\cos\theta_2 \end{cases}$$

$$\left.\begin{cases} p_i(0,t) + p_r(0,t) = p_t(0,t) \\ \cos\theta_1\, p_i(0,t)/Z_1 - \cos\theta_1\, p_r(0,t)/Z_1 = \cos\theta_2\, p_t(0,t)/Z_2 \end{cases}\right\}$$ *Diviser par p_i*

$$\begin{cases} 1 + p_r(0,t)/p_i(0,t) = p_t(0,t)/p_i(0,t) \\ \cos\theta_1/Z_1 - \cos\theta_1\, p_r(0,t)/[\,p_i(0,t)\,Z_1] = \cos\theta_2\, p_t(0,t)/[\,p_i(0,t)\,Z_2] \end{cases}$$

b) Coefficients de réflexion et transmission

Rappel :

Coefficient de réflexion : $r = p_r(0,t)/p_i(0,t)$

Coefficient de transmission : $t = p_t(0,t) / p_i(0,t)$

Attention aux Notations :
Ne pas confondre
t coef de transmission et t temps

Ce qui donne :

$$\begin{cases} 1 + r = t \\ \cos\theta_1/Z_1 - r\cos\theta_1/Z_1 = t\cos\theta_2/Z_2 \Leftrightarrow (1-r)\cos\theta_1/Z_1 = (1+r)\cos\theta_2/Z_2 \end{cases}$$

On obtient finalement :

$$r = (Z_2\cos\theta_1 - Z_1\cos\theta_2)/(Z_1\cos\theta_2 + Z_2\cos\theta_1)$$

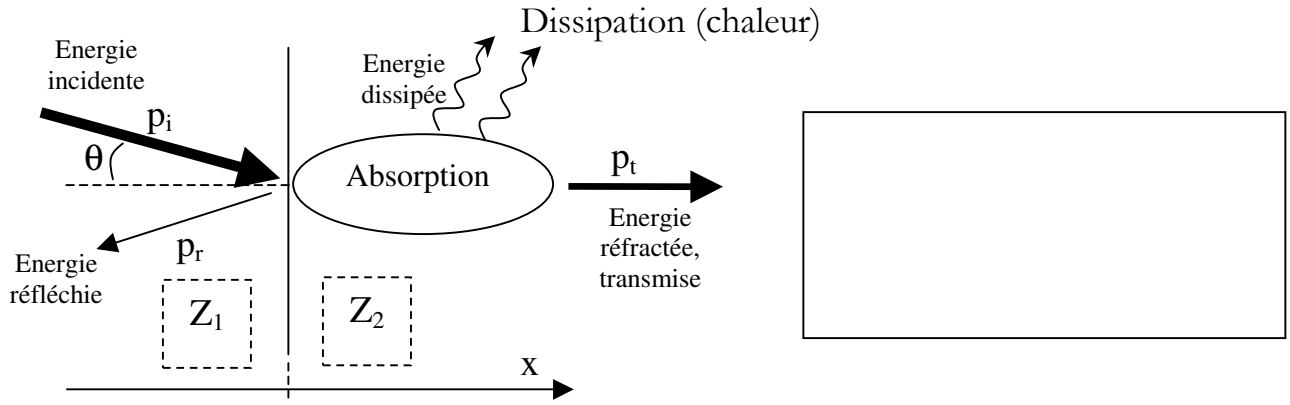
$$t = 2\,Z_2\cos\theta_1/(Z_1\cos\theta_2 + Z_2\cos\theta_1)$$

Ce qui donne :

$$R = r^2 = (Z_2\cos\theta_1 - Z_1\cos\theta_2)^2/(Z_1\cos\theta_2 + Z_2\cos\theta_1)^2$$

$$T = (4\,Z_2 Z_1\cos\theta_1\cos\theta_2)/(Z_1\cos\theta_2 + Z_2\cos\theta_1)^2$$

III – COEFFICIENT D'ABSORPTION



1°/ COEFFICIENT D'ABSORPTION DE LA PUISSANCE

Le coefficient α d'absorption de la puissance est défini par :

2°/ REMARQUES cas général

Dans le cas général, l'impédance acoustique dépend de la fréquence.

$$Z = \rho_0 c \, [\, X(\omega) + j\, Y(\omega) \,]$$

Phénomènes de dissipation — *Phénomènes de dynamiques*

Le coefficient de réflexion dépend de l'angle d'incidence et de la fréquence :

$$r(\theta,\omega) = (Z_2(\omega)\cos\theta - Z_1)/(Z_1 + Z_2(\omega)\cos\theta)$$

$$\alpha(\theta,\omega) = 1 - r(\theta,\omega)^2$$

3°/ ADAPTATION D'IMPEDANCE

Lorsque l'onde incidente est complètement absorbée, on dit qu'il y a adaptation d'impédance.

On a alors :

Adaptation d'impédance

coefficient de réflexion r =

coefficient d'absorption α =

Ceci est possible quand :

Sous incidence perpendiculaire :

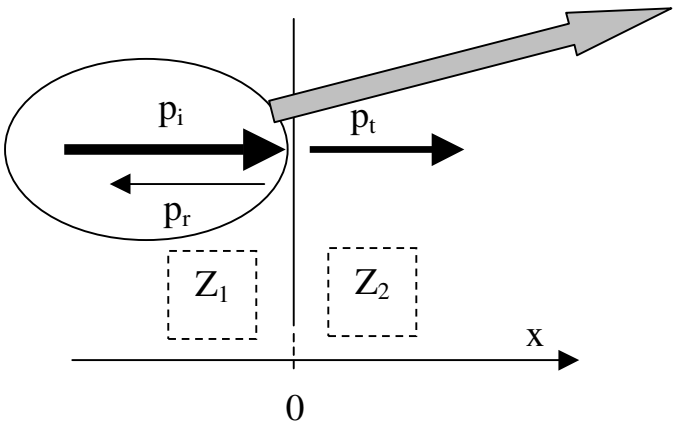
Une paroi ayant cette propriété est qualifiée de paroi souple.

Remarque :

Si $Z_2 = +\infty$ alors $r = 1$ et $\alpha = 0$ la paroi est totalement réfléchissante

Une telle paroi est qualifiée de paroi rigide.

4°/ ONDES STATIONNAIRES



Apparition d'ondes quasi stationnaires au voisinage de la paroi.

Maximum de la pression acoustique sur la paroi (ventre).

Pour les parois rigides pour lesquelles la reflexion est totale (R = 1), le niveau de pression sonore augmente théoriquement de 3 dB .

Remarque : Les microphones à zone de pression utilisent ce principe.

Remarque : Une écoute à proximité d'une surface réfléchissante est plus généreuse.

Chapitre 3 – THEORIE MODALE

I – PRINCIPE

La théorie modale de l'acoustique des salles est une approche ondulatoire du champ acoustique.

Il s'agit de déterminer la distribution de la pression sonore dans tout le volume considéré en résolvant l'équation de propagation tridimensionnelle à l'aide des conditions aux limites imposées par les parois.

Selon la forme de la salle et l'absorptions de parois, le problème peut vite devenir très complexe !

Les solutions font apparaître, compte tenu des réflexions, des ondes stationnaires ou quasi stationnaires résultant de la superposition des ondes incidentes et réfléchies.

Pour comprendre les phénomènes, on commencera par des situations simples : 2 parois en vis à vis puis on étend le résultat à un volume parallélépipèdique.

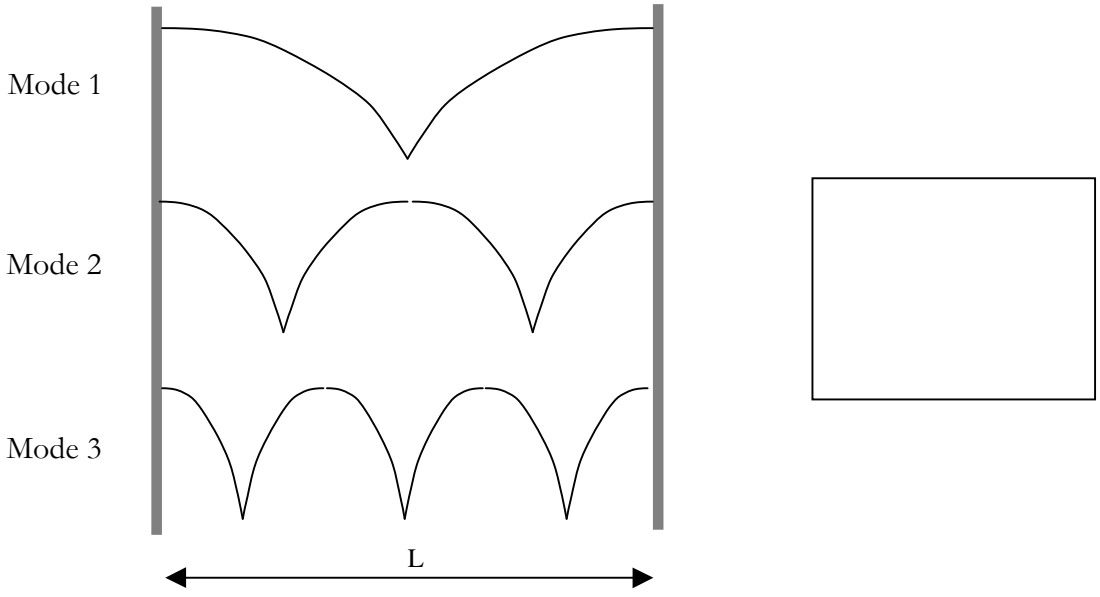
II – ONDES STATIONNAIRES EN MILIEU CLOS

1°/ CAS DE DEUX PAROIS PARALLELES

Considérons une source sonore de fréquence f placée entre les deux parois distantes de L parfaitement réfléchissantes.

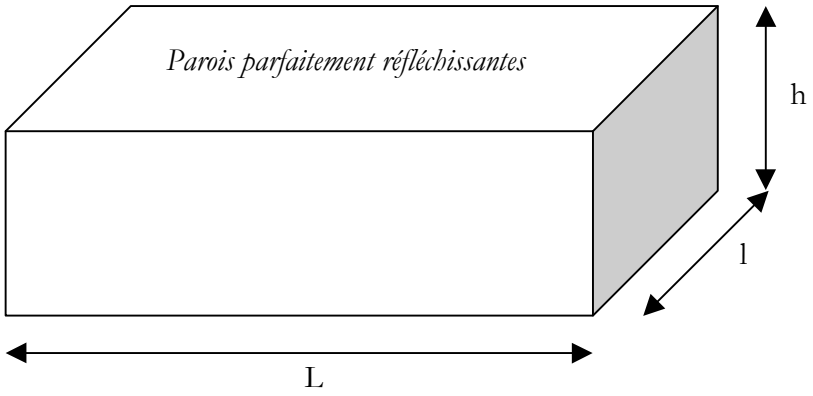
Comme dans le cas de la corde vibrante ou du tuyau sonore, lorsque :

$$f = n\,C / (2\,L) \quad \Rightarrow \text{Ondes stationnaires résonantes.}$$



Si certaines fréquences constituant un son périodique quelconque correspondent aux fréquences des modes propres du système des 2 parois, alors apparaissent des ondes stationnaires résonantes.

2°/ SALLE PARALLELEPIPEDIQUE



Il existe des modes propres entre chaque paroi en vis à vis :

$f_n =$ $f_m =$ $f_k =$

Ce qui donne un ensemble de fréquences propres :

Définitions :

f(n, 0, 0)
f(0, m, 0)
f(0, 0, k)

f(n, m, 0)
f(0, m, k)
f(n, 0, k)

f(n, m, k)

Energie croissante

Remarques :

Petite salle : Les modes propres sont plus écartés. Il est plus facile qu'un mode particulier soit excité, ce qui peut colorer le son.

Salle grande : Les modes propres sont très rapprochés, ils ont plus de chance d'être excités de la même manière. Cela engendre moins de coloration.

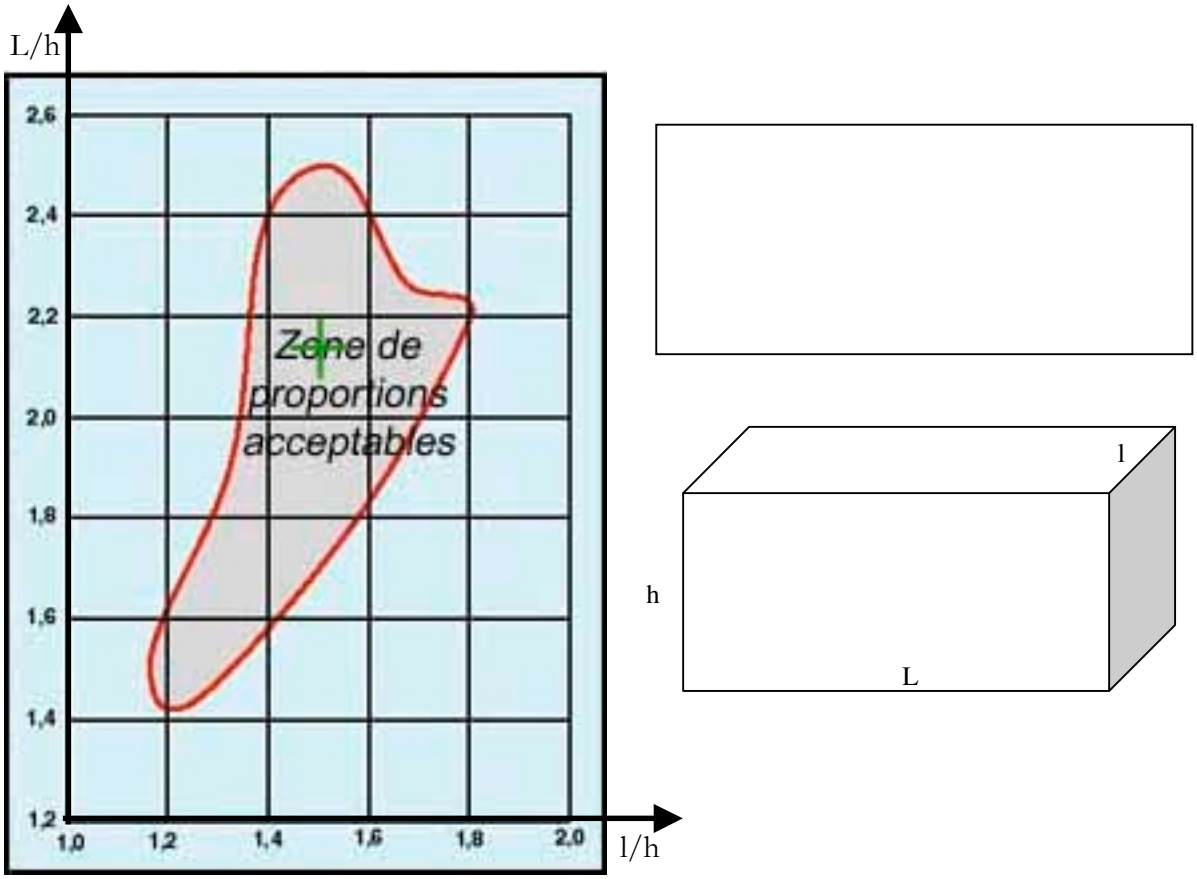
Salle avec 2 ou 3 dimensions identiques ou multiples : Certains modes propres apparaissent plusieurs fois et sont donc renforcés. Cela amplifie le phénomène de résonance et entraîne une coloration du son (phénomène de coïncidence).

Salles avec des dimensions très différentes : Cela a pour effet d'espacer les modes propres et on retrouve le risque qu'un mode propre particulier soit excité.

En conclusion, une salle doit avoir des dimensions différentes, mais pas trop et éviter des dimensions égales ou multiples.

3°/ DIAGRAMME DE BOLT

Les dimensions d'une salle doit favoriser une distribution homogène des modes propres et éviter leur concentration dans un domaine étroit de fréquences audibles.

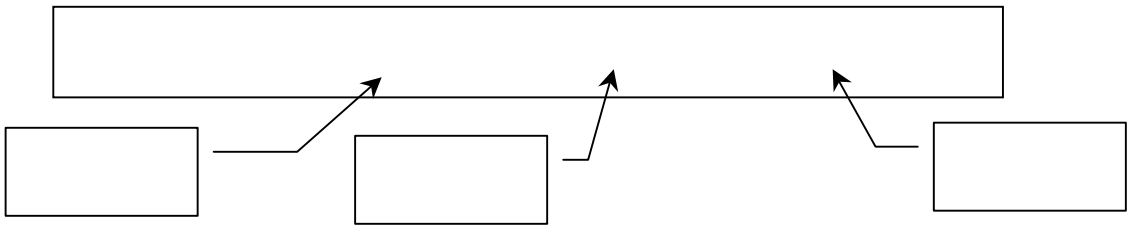


IV – DENSITE MODALE

1°/ DEFINITION

Rappel : Les fréquences propres d'une salle parallélépipédique sont :

Le nombre approximatif de modes de fréquences inférieures à f est donné par la relation :



V : volume de la salle, S : surface totale des parois
L : longueur totale des arrêtes.

Pour f suffisamment grande, le premier terme devient prépondérant et correspond à la prédominance des modes obliques.

Ainsi :

dN/df représente la densité fréquentielle des modes appelée densité modale et donne aussi l'écartement moyen entre deux modes consédutifs

⇔

- La densité modale augmente avec le carré de la fréquence de la source
- Cette expression reste en 1ère approximation valable pour toute forme de salle

2°/ PROPRIETES

Aux basses fréquences, la densité modale est faible : les modes propres sont isolés. L'analyse modale prend alors tout son sens, on cherche à éliminer les résonances en modifiant les parois.

Aux hautes fréquences, la densité modale est de plus en plus forte. Les modes se superposent. On utilise alors des méthodes statistiques.

3°/ FREQUENCE DE SCHROEDER

Lorsque les modes sont très rapprochés, il devient difficile de les distinguer. La réponse en fréquence de la salle devient continue.

La fréquence de Schroëder est donnée par :

Fs : fréquence de Scroeder en Hz
Tr : temps de réverbération de la salle en s
V : volume de la salle en m^3
L : plus petite longueur de la pièce en m

Cette fréquence dépend des phénomènes d'absorption des parois par l'intermédiaire du temps de réverbération.

Exemple : Salle de 1000 m^3 avec $T_r = 1s$ => fs = 63 Hz.

V – CONCLUSION

Quand un mode propre d'une salle est excité, cela correspond aussi à un phénomène de résonance. A chaque fréquence de résonance correspond un coefficient d'amortissement forcément faible, sinon il n'y aurait pas de résonance.
Cela signifie aussi que dans le domaine temporel, l'extinction du son sera plus lente.
On en vient alors au phénomène de réverbération.

L'approche modale par résolution de l'équation de propagation en fonction des dimensions d'une salle devient vite compliquée pour des formes complexes, mais peut-être traitée par ordinateur à l'aide de méthodes numériques.

En hautes fréquences, il devient difficile de séparer les différents modes : couplages, intermodulations, battements … l'énergie apparaît très diffuse.

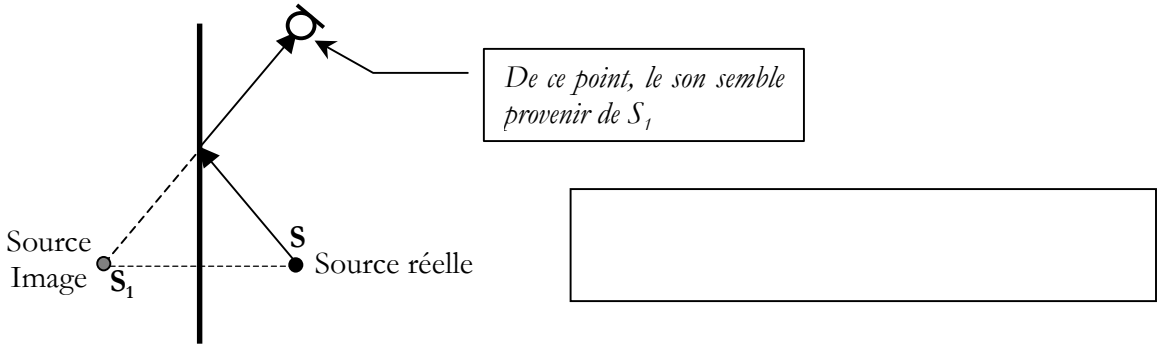
Chapitre 4 – APPROCHE GEOMETRIQUE

Approche la plus ancienne de l'acoustique des salles, elle repose sur l'analogie avec l'optique et est à la base des techniques numériques de simulation. Le son se propage selon des rayons sonores suivant le principe de Fermat. Cette méthode est utilisable aux hautes fréquences, tant que $\lambda <<$ dimensions des obstacles.

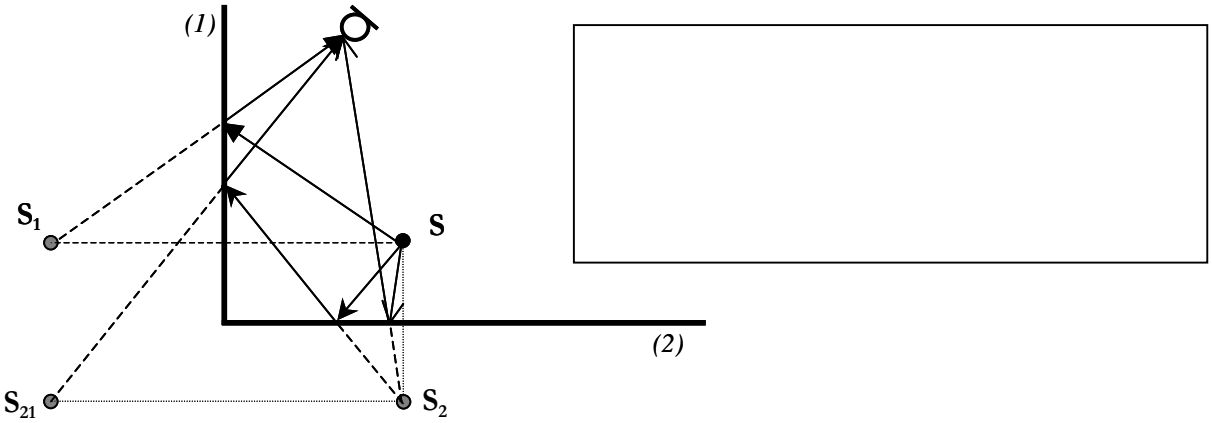
I – SOURCE REELLE SOURCE IMAGE

On considère une surface de séparation entre deux milieux et une source sonore ponctuelle S.

La surface de séparation est supposée parfaitement réfléchissante.



On considère un angle entre deux surfaces de réflexion :



II – SALLE PARALLELEPIPEDIQUE

1°/ SOURCES IMAGES OBTENUES

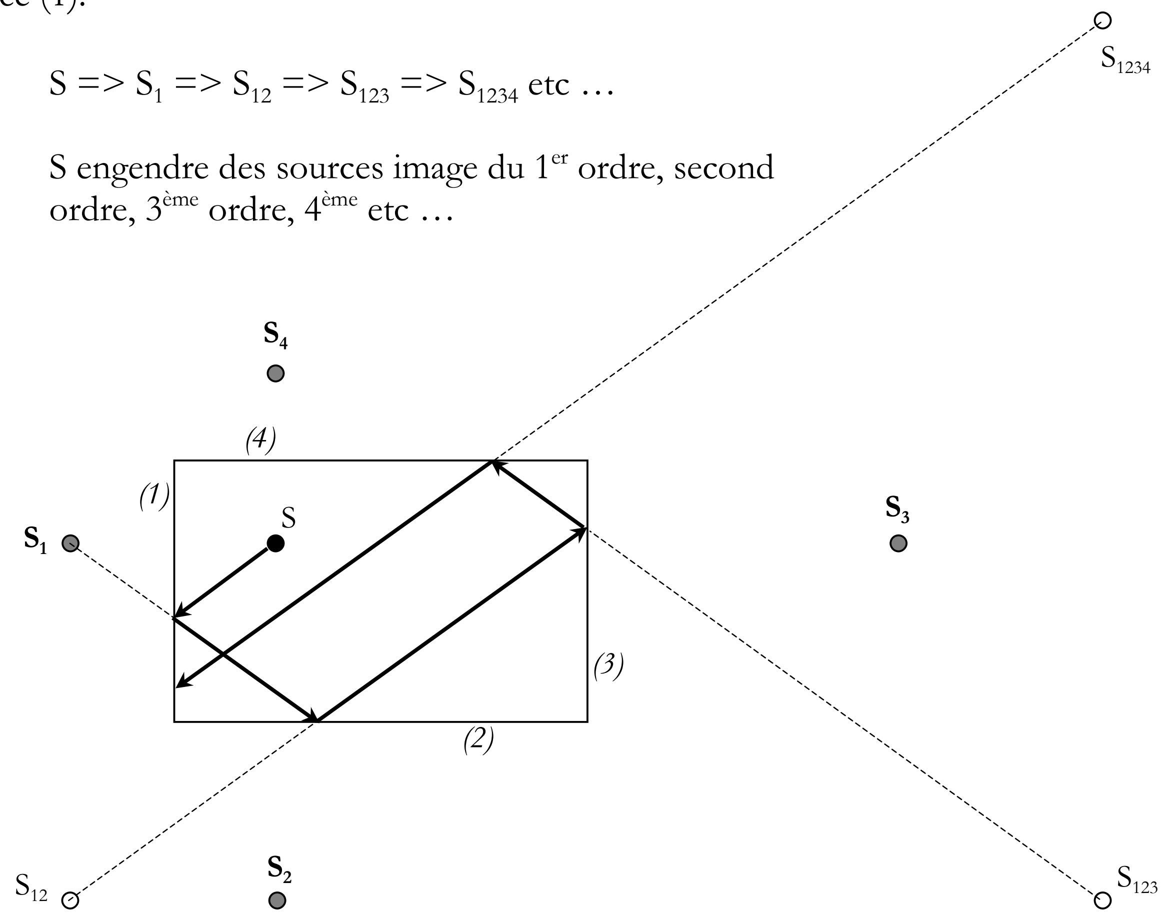
Soit S une source réelle placée à l'intérieur de la salle. Examinons tout d'abord le problème dans un plan horizontal de la salle comportant le point S.

Dans ce plan, S a une source image par face : S_1, S_2, S_3 et S_4.

Considérons un tir de rayon depuis S en direction d'un point quelconque de la surface (1).

S => S_1 => S_{12} => S_{123} => S_{1234} etc …

S engendre des sources image du 1^er^ ordre, second ordre, 3^ème^ ordre, 4^ème^ etc …



Si on considère une source impulsionnelle omnidirectionnelle, on peut considérer des tirs de rayons dans toutes les directions. On obtient alors un nombre de sources images très élevé.

Selon l'acousticien Jean Dominique Polack (1955 -), le nombre de sources images en jeu pendant un intervalle de temps dt est donné par :

$$dn = 4 \pi c^3 t^2 dt \ / \ V$$

⇔

Ceci donne le nombre de réflexions à l'instant t. (t=0 est l'instant où la source émet son impulsion). Le nombre de retours augmente au cours du temps. Il diminue lorsque le volume de la pièce augmente.

2°/ TEMPS DE MELANGE

a) Selon Polack

Il obtient :

Cette définition s'appuie sur les propriétés de l'oreille. Elle a tendance à surestimer le temps de mélange réel.

b) Autre définition

Le temps de mélange peut aussi être défini à partir des considérations suivantes :

En effet, autant les rayons réfléchis provenant des sources images d'ordre faibles sont prévisibles, autant ceux provenant des sources images d'ordres élevés prennent un caractère aléatoire à cause des phénomènes de diffraction sur les aspérités des parois.

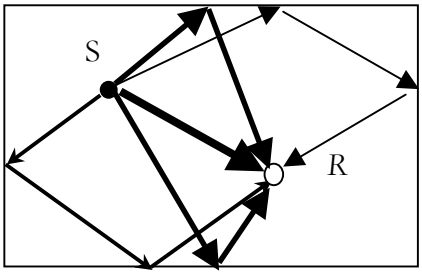
Autrement dit, on distingue les premières réflexions des réflexions plus tardives constituant un champ sonore diffus. (Voir chapitre suivant)

III – CONCLUSION

Le concept de rayon sonore utilisé en acoustique géométrique n'est valable que si l'on ne tient pas compte des phénomènes de diffraction et de diffusion sur les parois. Ceci n'est possible que pour des surfaces de réflexion suffisamment grandes et des aspérités petites par rapport aux longueurs d'ondes en jeux. Ceci est difficilement vérifiable dans la réalité et dépend en plus de la fréquence des signaux. Cette méthode est tout de même valable lorsque l'on s'intéresse à la trajectoire des rayons sonores et aux premières réflexions du son sur les parois.

Chapitre 5 - REPONSE IMPULSIONNELLE D'UNE SALLE

I – CHAMPS DIRECTS, REVERBERES ET DIFFUS



Quand on émet un son dans un espace fermé, on distingue le son direct et les sons réverbérés constituant chacun un champ sonore :

Les facteurs intervenant dans la constitution du champ sonore sont :

- La source : forme temporelle du signal, son spectre, sa puissance, sa directivité
- Les parois et les obstacles qui engendrent divers phénomènes qui dépendent eux-mêmes de la fréquence du signal :
  - *Réflexion*
  - *Diffusion*
  - *Diffraction*
  - *Absorption*

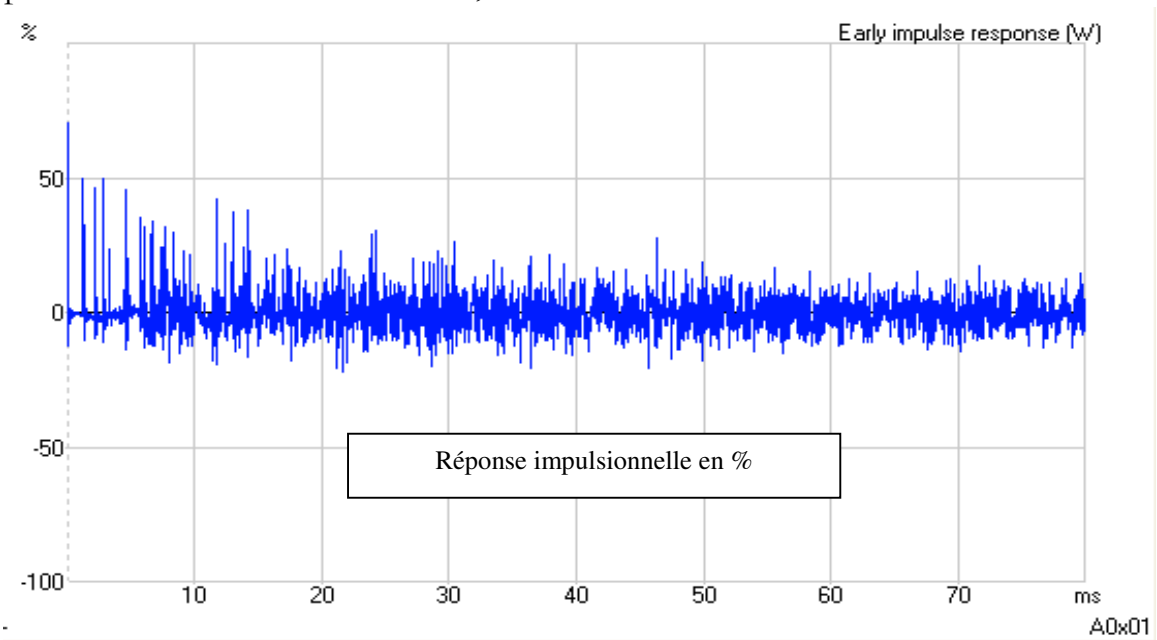
En effet lorsque la densité des retours devient trop importante il n'est plus possible de différencier les composantes du signal.

II – REPONSE IMPULSIONNELLE

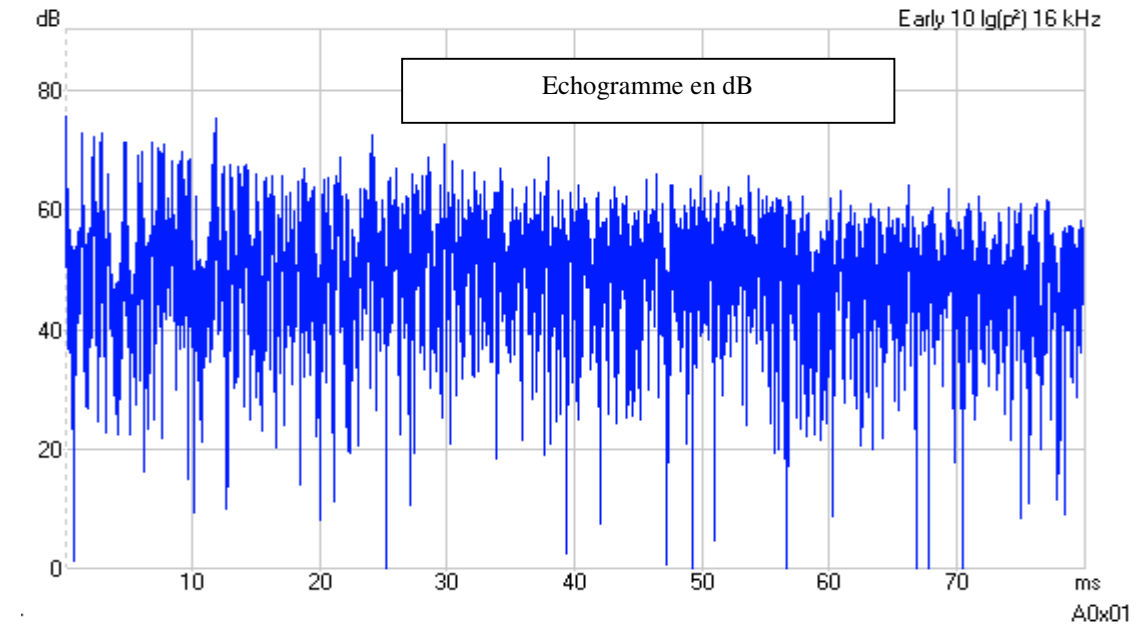
L'impulsion de Dirac n'étant pas réalisable, on considère comme impulsion, un signal sonore suffisamment bref : Il faut que la distance parcourue par ce son pendant sa durée dt soit petite par rapport aux distance sources obstacles.

La réponse impulsionnelle correspond à l'évolution temporelle de la pression acoustique en un point d'une salle, elle est mesurée à l'aide d'un microphone.

Ci-dessous une simulation à l'aide du logiciel CATT Acoustic de la réponse impulsionnelle d'une salle de 5*8*2,5 m



Réponse impulsionnelle en %

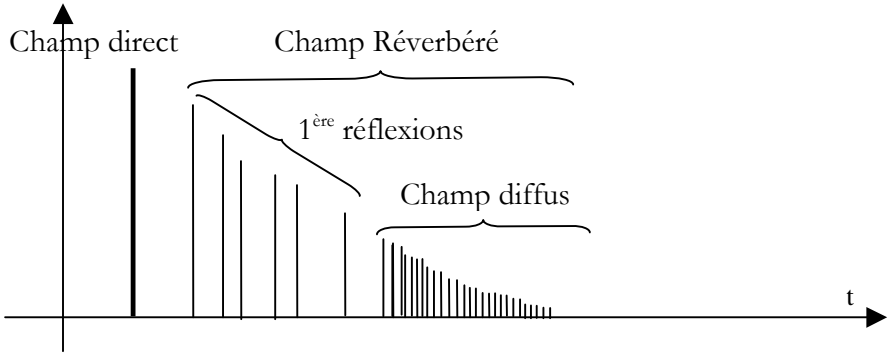


Echogramme en dB

La réponse impulsionnelle permet d'identifier la structure temporelle du son :

- *son direct*
- *premières réflexions ou réflexions précoces*
- *réflexions tardives*
- *échos*

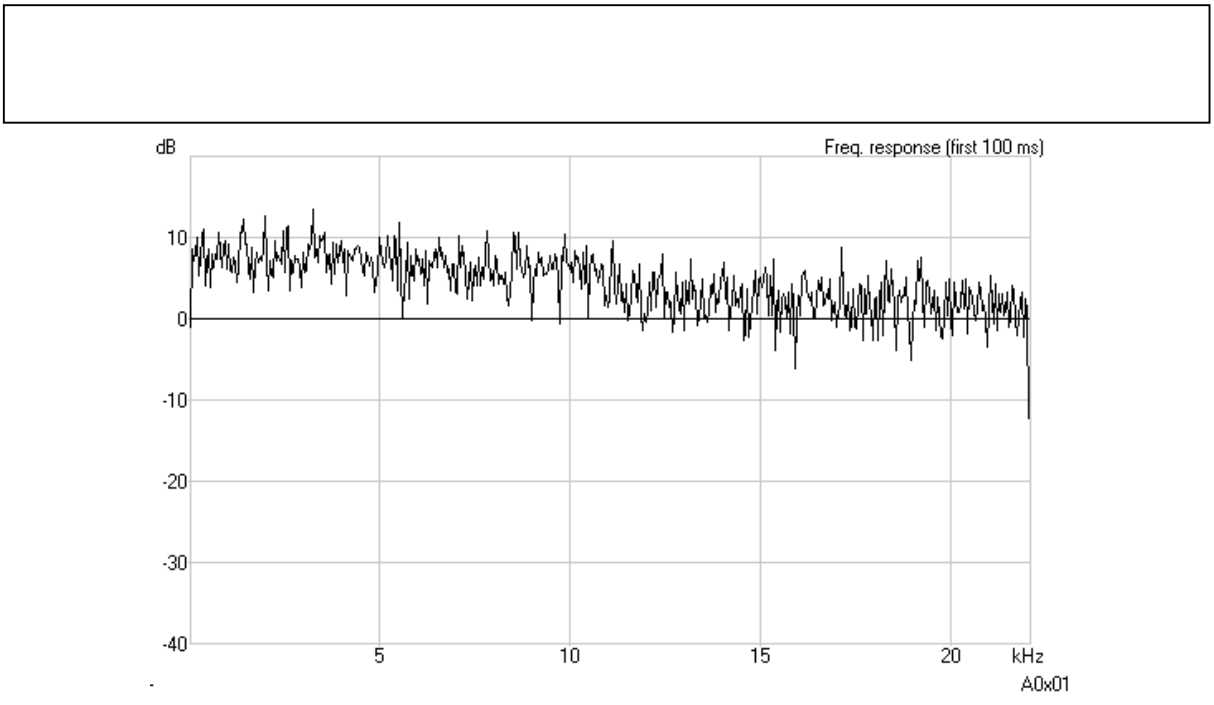
Schématiquement, une réponse impulsionnelle se présente ainsi :



La réponse impulsionnelle transcrite en dB ($10 \log[|p(t)|^2/P_0^2]$) est appelé échogramme.

L'échogramme représente les instants d'arrivée des rayons directs et indirects pour une position donnée de la source et du récepteur.

Les instants d'arrivée correspondent aux temps de propagation des rayons, les amplitudes correspondantes dépendent des coefficients d'absorption des parois.

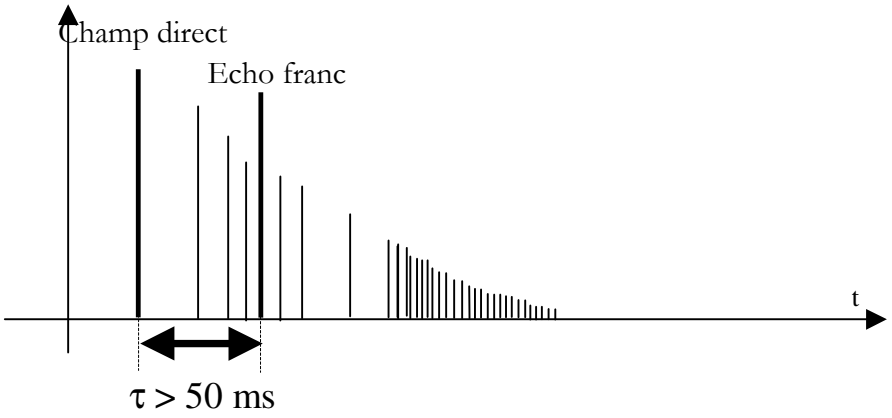


1°/ ECHO FRANC

L'oreille perçoit séparément deux impulsions sonores successives si l'intervalle de temps entre les deux est supérieur à 50 ms environ.

Ainsi on perçoit un écho si :

Exemple de réponse impulsionnelle présentant un écho :



La distance parcourue par une onde sonore en 50 ms est de 340 * 0,05 = 17 m.

Cette distance est la différence de trajet entre le son direct et le son indirect correspondant à l'écho. On peut ainsi s'attendre à voir apparaître des échos pour des salles ayant des dimensions approchant 10 m.

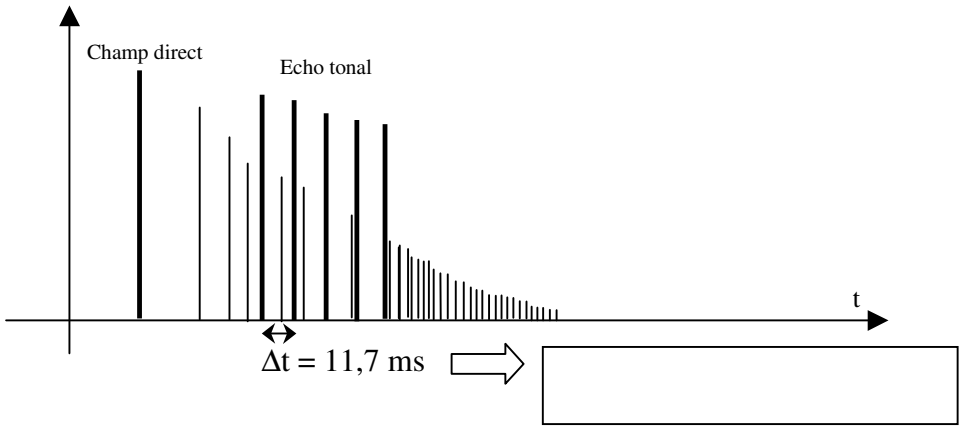
La perception d'un écho peut être très gênante, mais elle dépend de l'amplitude du son émis par la source, de sa direction et de sa nature (parole, musique, chant …).

2°/ ECHO TONAL

Considérons deux parois parallèles distantes de 4 m.
On place la source sonore et le récepteur au milieu.

La distance parcourue par un son indirect après une réflexion est donc de 2 fois 2m. Cela correspond à un pic à l'instant $\tau = 4/340 = 11{,}7$ ms.

Sur l'échogramme ou la réponse impulsionnelle, on observera des pics d'amplitude décroissante toutes les 11,7 ms suite aux multiples réflexions.

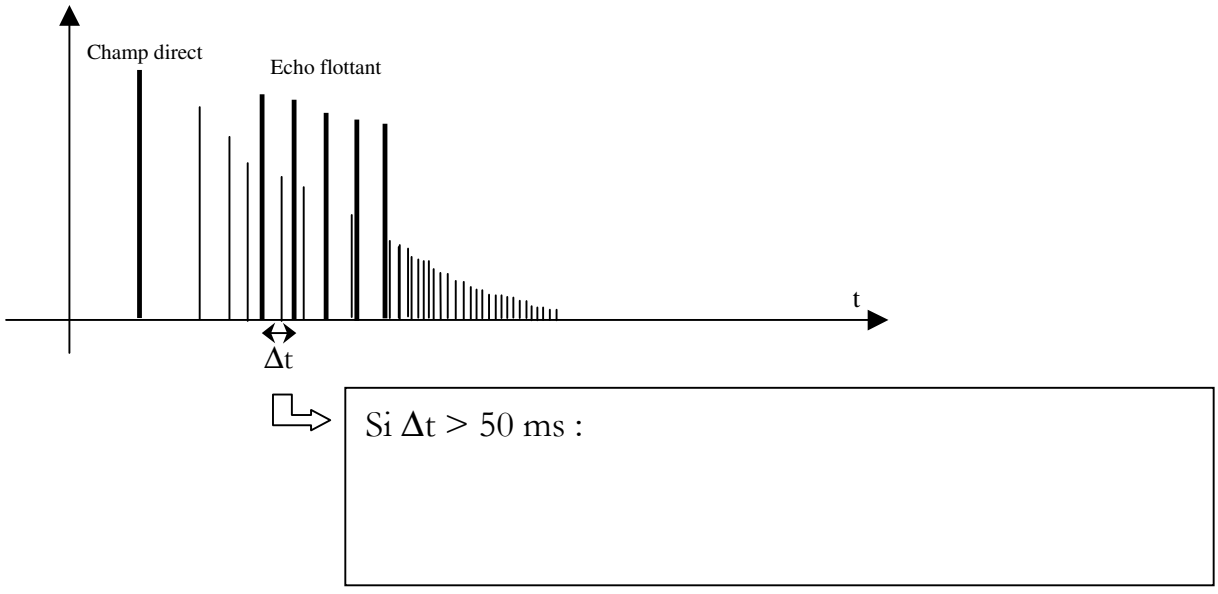


On voit apparaître une périodicité à $\Delta t = 11{,}7$ ms dans le signal temporel, ce qui correspond à un fondamental de $1/\Delta t = 85{,}4$ Hz et des raies aux fréquences multiples.

Ce type d'écho produit un son de fondamental $1/\Delta t$ d'où l'appellation écho « tonal ».

3°/ ECHO FLOTTANT (Flutter echo)

Il s'agit d'un écho tonal pour lequel l'oreille fait la discrimination entre les différents échos.

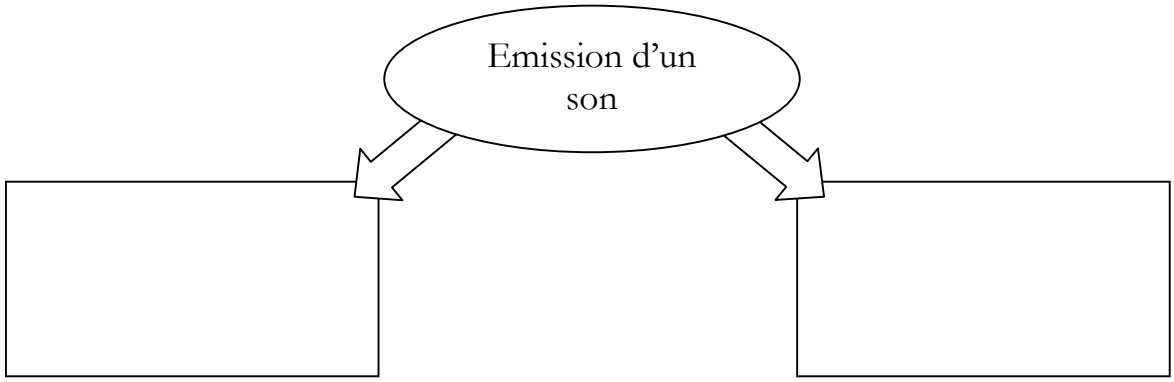


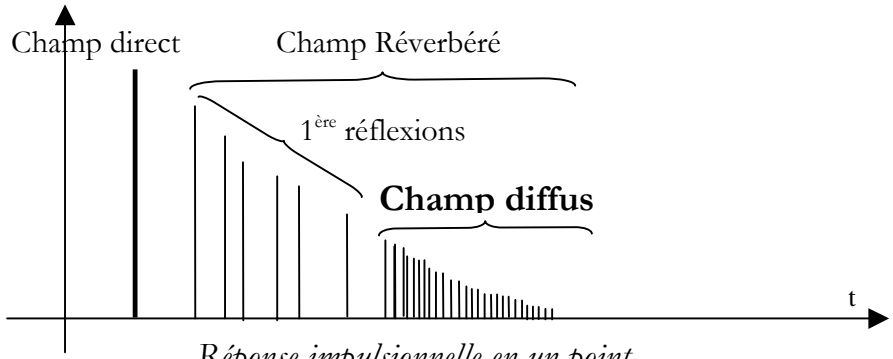
Chapitre 6 – LA REVERBERATION

La théorie de la réverbération a été développée par Wallace Clement Sabine au début du XXème siècle. Elle s'applique quand la densité modale est suffisamment forte (fréquences supérieures à la fréquence de Schroëder) ou quand les sons indirects sont mélangés.

I – PROPRIETES DU CHAMP DIFFUS

1°/ RAPPEL : ORIGINE DU CHAMP DIFFUS

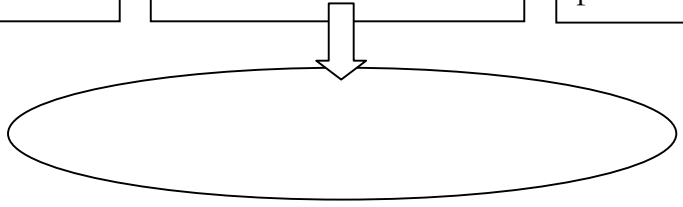


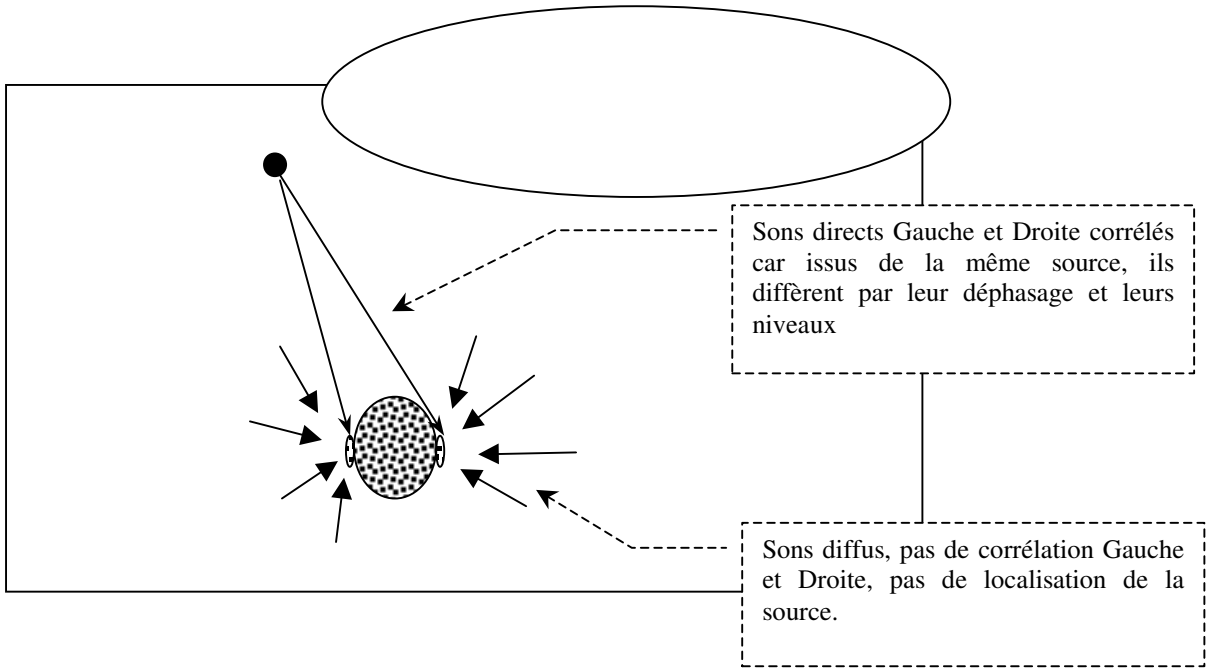


Réponse impulsionnelle en un point

2°/ PROPRIETES DU CHAMP DIFFUS

Le son diffus n'a pas de direction privilégiée	La densité d'énergie du son diffus est homogène dans la pièce	Le son diffus a un caractère aléatoire : pas de corrélation entre 2 instants ou 2 positions





3°/ BRUIT DE FOND

Au bout d'un certain temps, le champ diffus se confond avec le bruit de fond.

Au-delà de 65 dB(A) de bruit de fond, la conversation entre deux personnes placées à 1 m l'une de l'autre n'est plus possible à voix normale. Pour obtenir 100 % de compréhension, le niveau sonore ambiant ne doit pas dépasser 45 dB (A).
Cependant, la manière dont la voix est entendue dépend aussi des qualités acoustiques de la salle et des matériaux utilisés. Il ne faut pas, en particulier, que le temps de réverbération soit trop important.

Deux personnes placées dans une ambiance sonore de 80 dB(A) et conversant à voix élevée ne se comprennent de façon satisfaisante que situées à 25 cm l'une de l'autre.

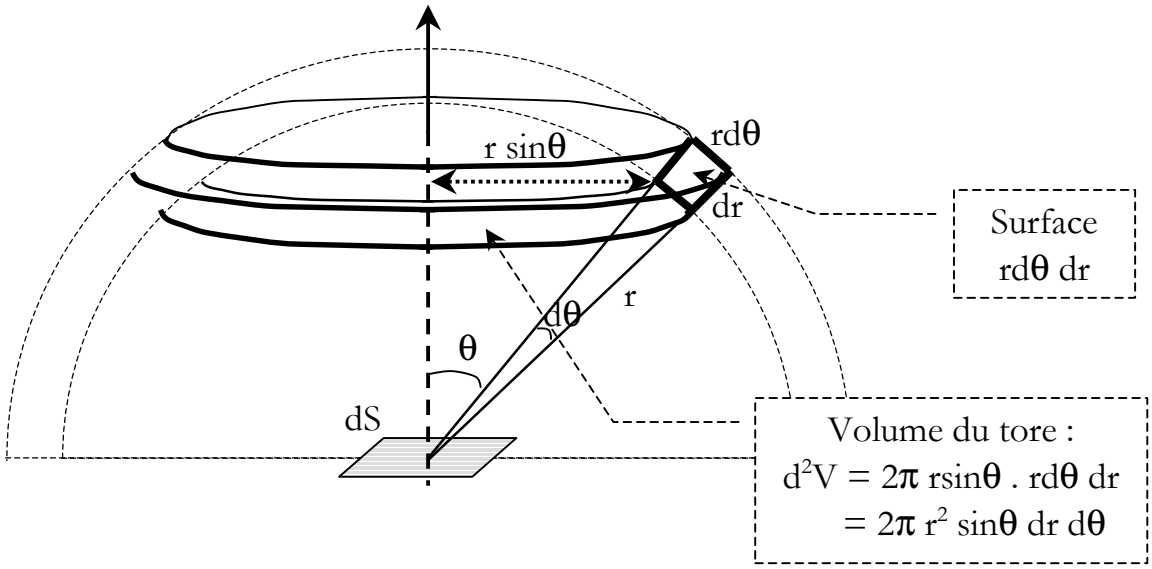
Niveau perturbateur de l'intelligibilité (dB)	Distance maximale d'intelligibilité pour la conversation normale (m)	Distance maximale d'intelligibilité pour la conversation à niveau de voix élevé (m)
35	4	15
40	2	10
45	1,5	6
50	1	4
55	0,5	2
60	0 ,25	1
65	0,20	0,75
70		0,5
80		0,25

III – INTENSITE SONORE EN CHAMP DIFFUS (régime permanent)

La relation $I = p^2/Z$ établie en champ libre n'est plus valable car la source d'énergie n'est plus localisée et unique.

On considère que le champ diffus possède une densité volumique d'énergie $\mathcal{E}$ (J/m3).

Soit un élément de volume dV situé à égale distance r d'un point M



Energie contenue dans dV :

Fraction de l'énergie contenue dans dV reçue par dS : $d^2E =$

Energie reçue par dS : $dE = \int_0^{\pi/2} (\mathcal{E}\ 2\pi\ r^2\ dr\ \sin\theta\ \cos\theta\ d\theta)$

$= \mathcal{E}\ 2\pi\ r^2\ dr \int_0^{\pi/2} \sin 2\theta\ d\theta\ /2$

$= \mathcal{E}\ 2\pi\ r^2\ dr\ [\ -1/4\ \cos 2\theta\ ]_0^{\pi/2}$

$= \mathcal{E}\ \pi\ r^2\ dr$

Or dr = c dt => Puissance reçue par dS : $\mathcal{P} = dE/dt = \mathcal{E}\ \pi\ r^2\ c$

Ainsi la puissance acoustique du champ diffus est $\mathcal{P} = \mathcal{E}\ \pi\ r^2\ c$

Le champ diffus est omnidirectionnel donc à la distance r l'intensité acoustique du champ diffus est :

$$I_r = \mathcal{P}/4\pi r^2 \Leftrightarrow$$

Si on considère le champ diffus comme une onde plane, on peut utiliser l'impédance acoustique. On a vu Acoustique 1 Chapitre 7 § IV 3°/ :

$$\mathcal{E} = P_{r\,m}^{\,2} / (2 \rho c^{2}) = P_{r\,eff}^{\,2} / (\rho c^{2})$$

Ceci donne l'expression de l'intensité acoustique du champ réverbéré en fonction de la pression efficace :

$$I = P_{eff}^{2} / (4 \rho c)$$

Conclusion :

En champ libre : En champ diffus :

⇨ *Pour une même pression acoustique le champ diffus donne une intensité acoustique 4 fois moindre que le champ direct considéré comme libre.*

III – ETABLISSEMENT EXTINCTION DU SON

1°/ ABSORPTION DES PAROIS

a) Coefficient d'absorption des parois

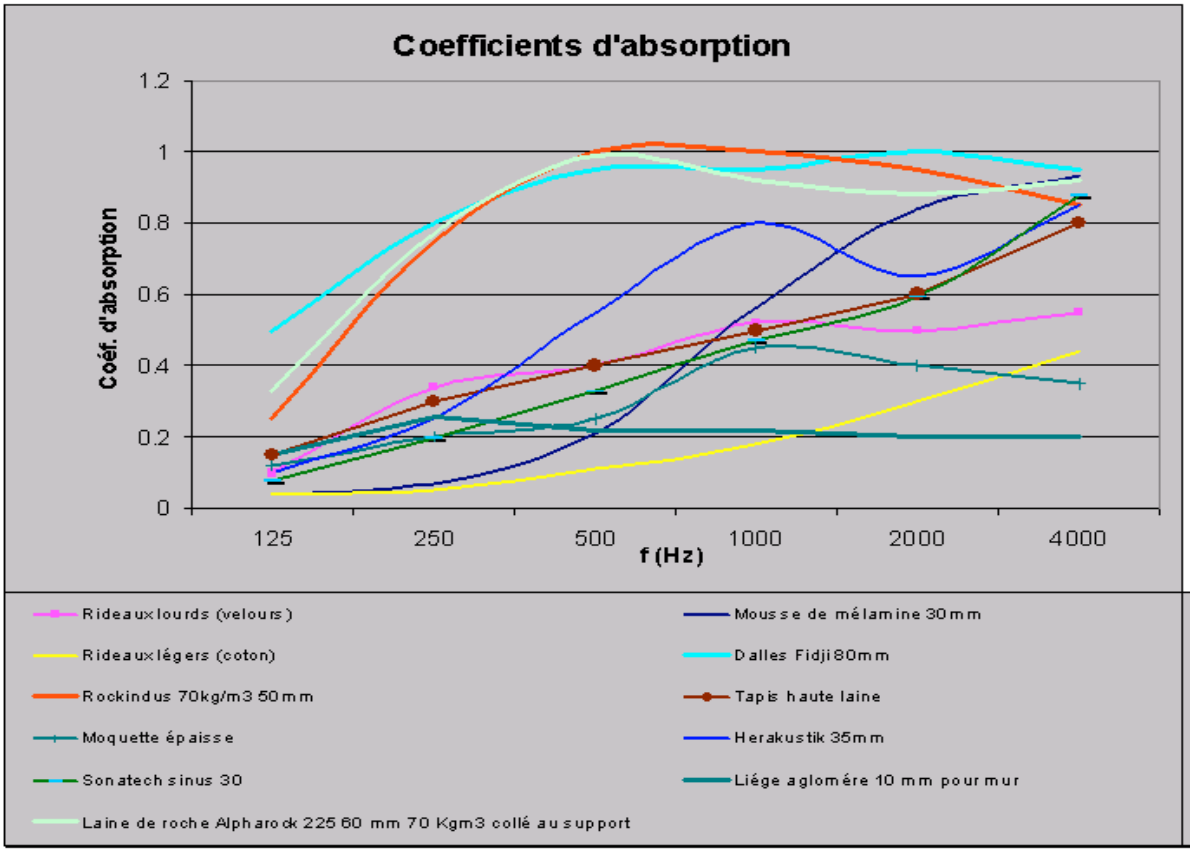
Définition :

$\alpha =$

=> dépend du matériau
de l'angle
de la fréquence

Rappel : $\alpha = 1$ absorption totale
$\alpha = 0$ réflexion totale

Exemples de coefficients d'absorption en fonction de la fréquence de divers matériaux :



b) Coefficient d'absorption moyen

La salle est délimitée par des surfaces différentes S_1, S_2, S_3 etc … ayant des coefficients d'absorption différents α_1, α_2, α_3 etc …

Le coefficient d'absorption moyen est :

$\alpha_m =$

c) Surface d'absorption équivalente

$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \ldots$

$= \alpha_{moy} (S_1 + S_2 + S_3 + \ldots)$

Par suite : $\alpha_{moy} = A / S$

S surface totale des parois

On a forcément : $A < S$

2°/ ETABLISSEMENT DU SON REVERBERE

On considère une salle de volume V dans laquelle on émet un son de puissance $\mathcal{P}$ constante pendant toute la phase d'établissement du son.

$\mathcal{P}_a$ est la puissance absorbée par les parois.

$\mathcal{E}$ est la densité volumique d'énergie

La variation de la densité volumique d'énergie pendant un intervalle de temps dt est due à l'absorption des parois :

$$d(\mathcal{E}\, V) = \mathcal{P}\, dt - \mathcal{P}_a\, dt \qquad (1)$$

Soit α_m le coefficient d'absorption moyen des parois
I_a l'intensité acoustique absorbée
Ir l'intensité acoustique du champ incident
Le champ réverbéré considéré comme diffus :

La puissance absorbée est :

$$\mathcal{P}_a = S \cdot I_a = S\, \alpha_m\, I_r = A\, I_r \qquad \text{avec : } I_r = \mathcal{E}\, c / 4$$

En reprenant (1) :

$$d(\mathcal{E}\, V)/dt = \mathcal{P} - A\, \mathcal{E}\, c / 4$$
$$V\, d\mathcal{E}/dt + A\, \mathcal{E}\, c / 4 = \mathcal{P}$$

D'où l'équation différentielle régissant l'établissement de la densité volumique d'énergie :

La solution pour $\mathcal{P}$ constante : $\mathcal{E}(t) = (4\mathcal{P}/Ac)\,[\,1 - \exp(-(Ac/4V)\,t)\,]$

D'où la loi d'évolution de l'intensité acoustique : $Ir = \mathcal{E}\, c / 4$

En réponse à une source de puissance $\mathcal{P}$, le champ réverbéré croit vers son régime permanent $\mathcal{P}/A$ avec une constante de temps $\tau = 4V/Ac$

Constante de temps de la salle :

Remarque : V augmente => τ augmente

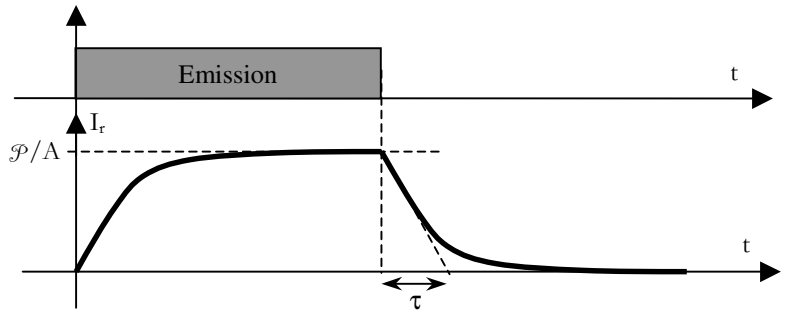
α augmente (surfaces + absorbantes) => A augmente => τ diminue

3°/ EXTINCTION DU SON REVERBERE

On reprend les résultats du § précédent avec $\mathcal{P} = 0$:

$$\mathcal{E}(t) = (4\mathcal{P}/Ac) \quad \exp(- (Ac/4V)\, t\,)$$

L'intensité acoustique du champ réverbéré tend vers 0.



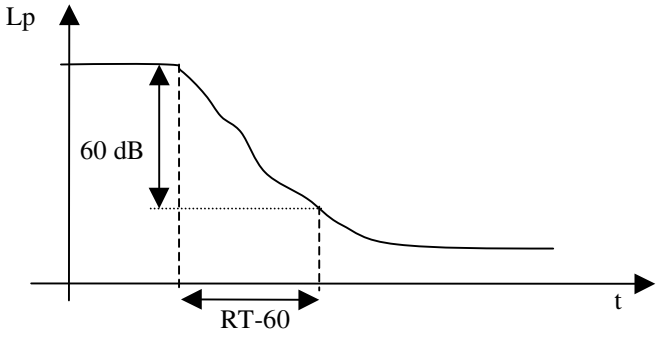
4°/ TEMPS DE REVERBERATION RT60

Le temps de réverbération RT60 est la durée au bout de laquelle le niveau d'intensité acoustique décroît de 60 dB.

On a donc : $10 \log I_r(T_r) / I_r(0) = - 60 \Leftrightarrow I_r(T_r) = 10^{-6}\, I_r(0) \Leftrightarrow P_r(T_r) = 10^{-3}\, P_r(0)$

RT60 $\Leftrightarrow$ {

En réalité la mesure de ce temps de réverbération pose souvent problème puisqu'elle nécessite une dynamique de 60 dB peu réaliste. Par exemple si la valeur maxi est de 90 dB, le RT-60 correspond à l'instant où le niveau d'intensité acoustique est de 30 dB. Les niveaux de bruit de fond sont souvent supérieurs, le RT-60 n'est alors pas mesurable.



En pratique la source sonore utilisée est souvent constituée d'un HP relié à une source de bruit rose de façon à exciter le maximum de modes propres de la salle.

Expression du RT60 :

$Lp(t) - Lp(0) = -60 \Leftrightarrow 10 \log [I_r(t)/I_0] - 10 \log [I(0)/I_0] = -60$

$10 \log I_r(t) - 10 \log I_0 - 10 \log I(0) + 10 \log I_0 = -60$

$10 \log Ir(t)/I(0) = -60$

$10 \log [\exp(-(Ac/4V)\, t)] = -60$

$-10 (A\, c\, t / 4\, V) \log e = -60$

$t = 24\, V / (A\, c \log e)$

24/(340 loge) ≈ 0,16

Finalement :

Remarques :

Plus le volume de la salle augmente, plus elle accumule d'énergie acoustique et met donc du temps à se « vider » : le temps de réverbération augmente avec le volume.

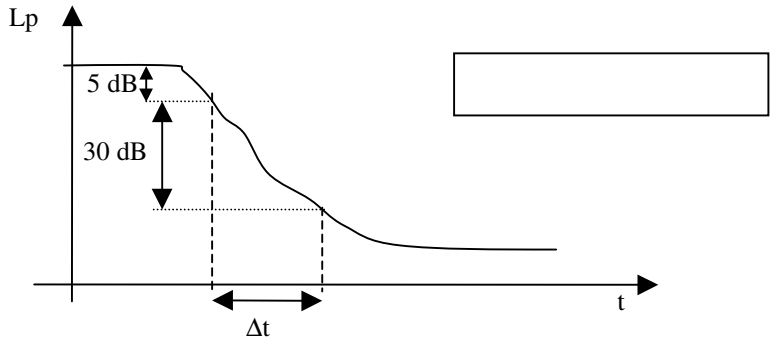
Plus les surfaces sont réfléchissantes plus le temps de réverbération est grand, c'est logique : Si $\alpha = 0 \Rightarrow A = 0$ et $RT60 = +\infty$

Inversement, si α augmente (surfaces + absorbantes) => A augmente => RT60 diminue : Si $\alpha = 1 \Rightarrow A = S$ et $RT60 = 0{,}16\ V/S$. Il devrait tendre vers 0 !

En conclusion, le RT60 de Sabine n'est pas valable pour les salles trop absorbantes telles que $\alpha > 0{,}2$. Le RT60 de sabine donne une valeur surestimée, d'autant plus surestimée que α est grand.

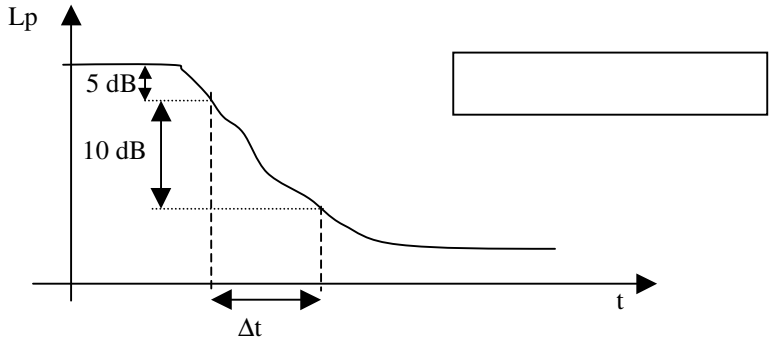
5°/ TEMPS DE REVERBERATION RT-30

L'EDT est le temps mis par le niveau d'intensité sonore pour décroître de 60 dB en mesurant le temps de décroissance sur 30 dB (de –5 à –35 dB) et en interpolant linéairement.



6°/ EDT EARLY DECAY TIME

L'EDT est le temps mis par le niveau d'intensité sonore pour décroître de 60 dB en mesurant le temps de décroissance sur 10 dB (de –5 à –10 dB) et en interpolant linéairement.



7°/ LIBRE PARCOURS MOYEN ET FORMULE D'EYRING

a) Nombre moyen de réflexions par seconde

Considérons une salle de volume V et de surface totale des parois S.

Soit $\mathcal{E}$ la densité volumique d'énergie du champ réverbéré.

L'intensité du champ réverbéré est $I_r = \mathcal{E}\ c / 4$

Le nombre moyen de réflexions par seconde sur les parois est donné par :
N = Puissance totale du champ diffus sur les parois / Energie totale contenue dans le volume

Ainsi :

$$N = I_r S / \mathcal{E} V = \mathcal{E}\ c S / 4 \mathcal{E} V$$
$$= c S / (4 V) \quad \text{s'exprime en } s^{-1}$$

b) Libre parcours moyen

La distance moyenne parcourue entre deux reflexions est : $l = c/N = 4\,c\,/\,S$

c) Temps de réverbération de Norris Eyring

Norris et Eyring considèrent qu'à chaque réflexion, une partie de l'énergie est absorbée par les parois.

Intensité acoustique présente lors de la coupure du son : $I_r(0) \Rightarrow \alpha\, I(0)$ absorbée

Reste après la 1ère réflexion : $I_r(0) - \alpha\, I_r(0) = I_r(0)(1-\alpha)$
Reste après la 2ème réflexion : $I_r(0)(1-\alpha)^2$
etc …

Après n réflexions, on a une intensité acoustique : $I_r(0)(1-\alpha)^n$

En prenant en compte le nombre N de réflexion par seconde, on a $n = N\,t$
Ainsi : $I_r(t) = I_r(0)(1-\alpha)^{N\,t}$

Expression de RT60 selon Eyring :

$$Lp(t) - Lp(0) = -60 \Leftrightarrow 10\log[I_r(t)/I_0] - 10\log[I(0)/I_0] = -60$$
$$10\log I_r(t) - 10\log I_0 - 10\log I(0) + 10\log I_0 = -60$$
$$10\log Ir(t)/I(0) = -60$$
$$\log[I_r(0)(1-\alpha)^{N\,t} / I_r(0)] = -6$$
$$Nt\log(1-\alpha) = -6$$
$$t = -6 / N\log(1-\alpha) \quad \text{or} \quad N = c\,S\,/\,4V$$

donc $t = -24\,V\,/\,(c\,S\log(1-\alpha))$

Finalement :

Remarques :

Salle réverbérante : $\alpha = 0 \Rightarrow RT60_{Eyring} = +\infty$
Salle absorbante : $\alpha = 1 \Rightarrow RT60_{Eyring} = 0$ Ces résultats sont logiques.
Le $RT60_{Eyring}$ est donc plus adaptée aux salles absorbantes que le RT60 de Sabine.

IV – NIVEAUX SONORES

1°/ CHAMP DIRECT

Le champ direct est un champ libre.
Ainsi, pour une source de puissance $\mathcal{P}$ et de directivité Q, on a :

$$I = \mathcal{P}\, Q \,/\, (4\pi d^2)$$

$I_0 = 10^{-12}$ W/m^2

$$L_i = L_p = 10 \log \mathcal{P} / I_0 + 10 \log Q/(4\pi d^2)$$

$$L_i = L_p = L_W + 10 \log Q/(4\pi d^2)$$

Pour une onde plane, $I = P_{eff}^2/Z$

2°/ CHAMP REVERBERE

En régime permanent, on a :

$$I_r = \mathcal{P}/A$$

$$L_{ir} = 10 \log \mathcal{P}/(A\, I_0) = 10 \log \mathcal{P}/I_0 - 10 \log A$$

$$L_{ir} = L_W - 10 \log A$$

Pour une onde plane, $I_r = P_{r\,eff}^2/4Z$

Ainsi : $L_{ir} = 10 \log [(P_{r\,eff}^2/4Z) / I_0] = 10 \log [P_{r\,eff}^2/(4Z \cdot 10^{-12})]$

$$= 10 \log [P_{r\,eff}^2/(4. 10^{-10} \cdot Z \cdot 10^{-2})]$$

$$= 10 \log [P_{r\,eff}^2/(2. 10^{-5})^2] - \underbrace{10 \log (Z.10^{-2})}$$

Or $Z = \rho\, c \approx 400$ kg m^{-2} s^{-2} ce qui donne $10 \log (Z \cdot 10^{-2}) = 10 \log (4) = 6$ dB

Finalement :

$$L_{ir} = L_{pr} - 6 \text{ dB}$$

$$L_{pr} = L_W - 10 \log A + 6 \text{ dB}$$

3°/ CHAMP TOTAL

a) Intensité acoustique

$$I_{tot} = I + I_r$$

$$I_{tot} = \mathcal{P}\, Q / (4\pi d^2) + \mathcal{P}/A = \mathcal{P} [\, Q / (4\pi d^2) + 1/A \,]$$

d) Niveau d'intensité acoustique

$$L_{i\,tot} = 10 \log [\, \mathcal{P} \,(Q / (4\pi d^2) + 1/A \,) / I_0 \,]$$

$$= 10 \log [\, \mathcal{P} / I_0 \,] + 10 \log [\, Q / (4\pi d^2) + 1/A \,]$$

$$L_{i\,tot} = L_W + 10 \log [\, Q / (4\pi d^2) + 1/A \,]$$

c) Pression acoustique

$$p_{tot} = p + p_r \Rightarrow p_{tot}^2 = p^2 + p_r^2 + 2\, p\, p_r$$

En moyenne quadratique (valeur efficace) , $P_{tot}^2 = P^2 + P_r^2$

En effet , $p\, p_{r\,moy} = 0$ *car* p *et* pr *ne sont pas corrélés*

Or :

En champ libre : $I = P_{eff}^2 / (\rho\, c) = P_{eff}^2 / Z$ et $I = \mathcal{P}\, Q / (4\pi d^2)$

En champ diffus : $I_r = P_{eff}^2 / (4\, \rho\, c) = P_{r\,eff}^2 / 4Z$ et $I_r = \mathcal{P}/A$

Donc : $P_{tot}^2 = Z\, I + 4\, Z\, \mathcal{P}/A \Rightarrow$ $P_{tot}^2 = Z\, \mathcal{P} [\, Q/(4\pi d^2) + 4/A \,]$

d) Niveau de pression acoustique

$L_{p\,tot} = 10 \log P_{tot}^2/P_0^2$ avec $P_0 = 2.\,10^{-5}$ et $Z = 400$ kg m^{-2} s^{-2}

On a ainsi :

$$L_{p\,tot} = 10 \log Z\,\mathcal{P}/(2.\,10^{-5})^2 + 10 \log [\ Q/(4\pi d^2) + 4/A\ ]$$

$$= 10 \log\ (\mathcal{P}/\ 10^{-12})\ + 10 \log [\ Q/(4\pi d^2) + 4/A\ ]$$

Et finalement :

VI - COMPARAISON DES CHAMPS DIRECT ET REVERBERE

1°/ GROSSISSEMENT ACOUSTIQUE

Le grossissement acoustique est le rapport des moyennes quadratiques des champs direct et réverbéré :

$$G = P^2 / P_r^2 = [\ Z\mathcal{P}Q / (4\pi d^2)\ ]\ /\ [\ \mathcal{P}4Z/A\ ]$$

Remarques :

- Le grossissement acoustique est indépendant de la puissance $\mathcal{P}$ de la source.
- Le grossissement acoustique dépend de l'absorption des parois par l'intermédiaire de A
- Le grossissement acoustique dépend de la directivité de la source
- Le grossissement acoustique dépend de la distance récepteur source
    - *d faible => champ direct dominant*
    - *d grande => champ réverbéré prépondérant.*

2°/ RAYON ACOUSTIQUE

Le rayon acoustique d_a est la distance pour laquelle G = 1

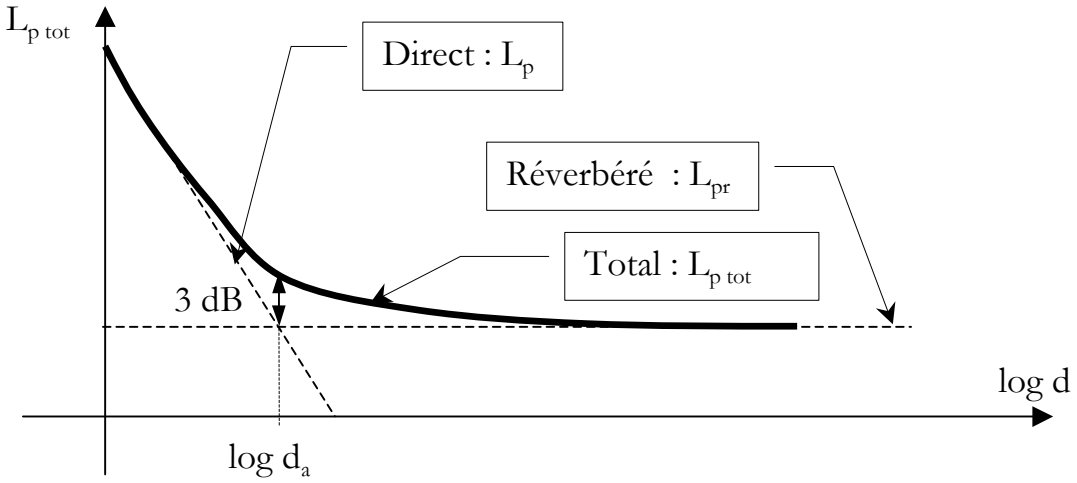
$$QA / (16 \pi d^2) = 1 \Leftrightarrow$$

3°/ COURBE $L_{p\ tot}$ (d)

Direct : $= L_W + 10 \log [Q/(4\pi d^2)]$

Réverbéré : $L_{pr} = L_W - 10 \log A + 6$ dB

Total : $L_{p\ tot} = L_W + 10 \log [Q/(4\pi d^2) + 4/A]$



Niveau de pression acoustique total en d_a :

$$L_{p\ tot} = L_W + 10 \log [Q/(4\pi(AQ/16\pi)^2) + 4/A]$$

$$= L_W + 10 \log [4/A + 4/A]$$

$$= L_W + 10 \log 2 + 10 \log 4 - 10 \log A$$

$$= L_W + 6 - 10 \log A + 3 \text{ dB}$$

Au final :

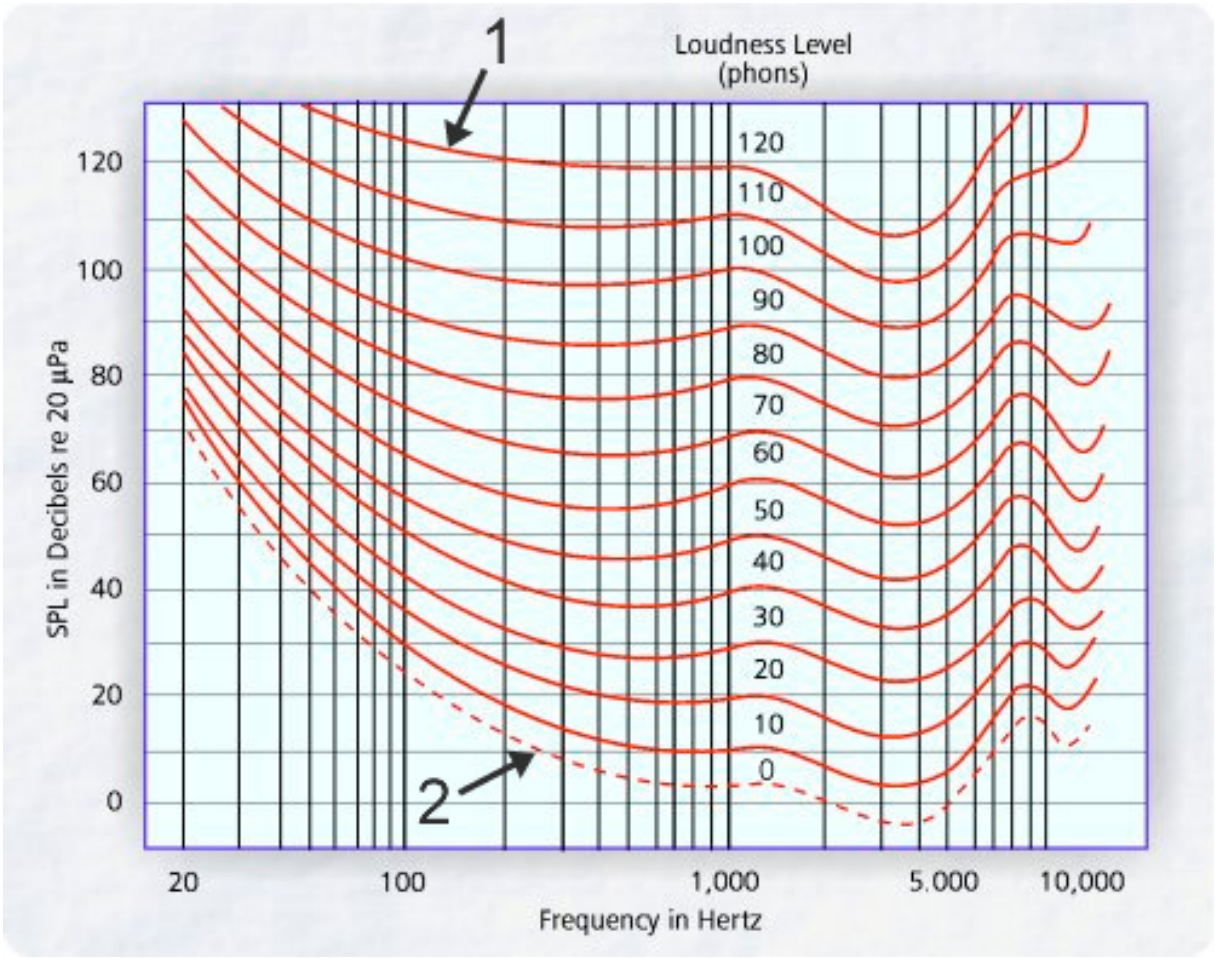
Chapitre 7 - MESURES DE BRUIT

I – NIVEAU SONORE PERCU

La connaissance du niveau de pression sonore L en un point constitue une donnée objective.

L'oreille humaine pour un même niveau de pression sonore n'est pas identiquement sensible. La sensation dépend de l'intensité et de la fréquence du son, de son timbre et de sa durée.

En effet, les courbes isosoniques de Fletcher et Munson mettent en évidence que l'oreille est plus sensible aux fréquence médium qu'aux BF et à un degré moindre aux HF. Cette propriété étant plus nette à faible niveau d'écoute. (Cf Ch8 § V 1er module).



Cela signifie que pour évaluer la perception sonore humaine, il faut utiliser un appareil qui reconstitue les propriétés de l'oreille et non un appareil qui mesure seulement des niveaux sonores en dB.

Pour cela on utilise donc un sonomètre. En vue de l'étude de son fonctionnement et de son utilisation, nous allons introduire les différentes notions nécessaires.

Auparavant soulignons encore quelques autres propriétés de l'oreille :

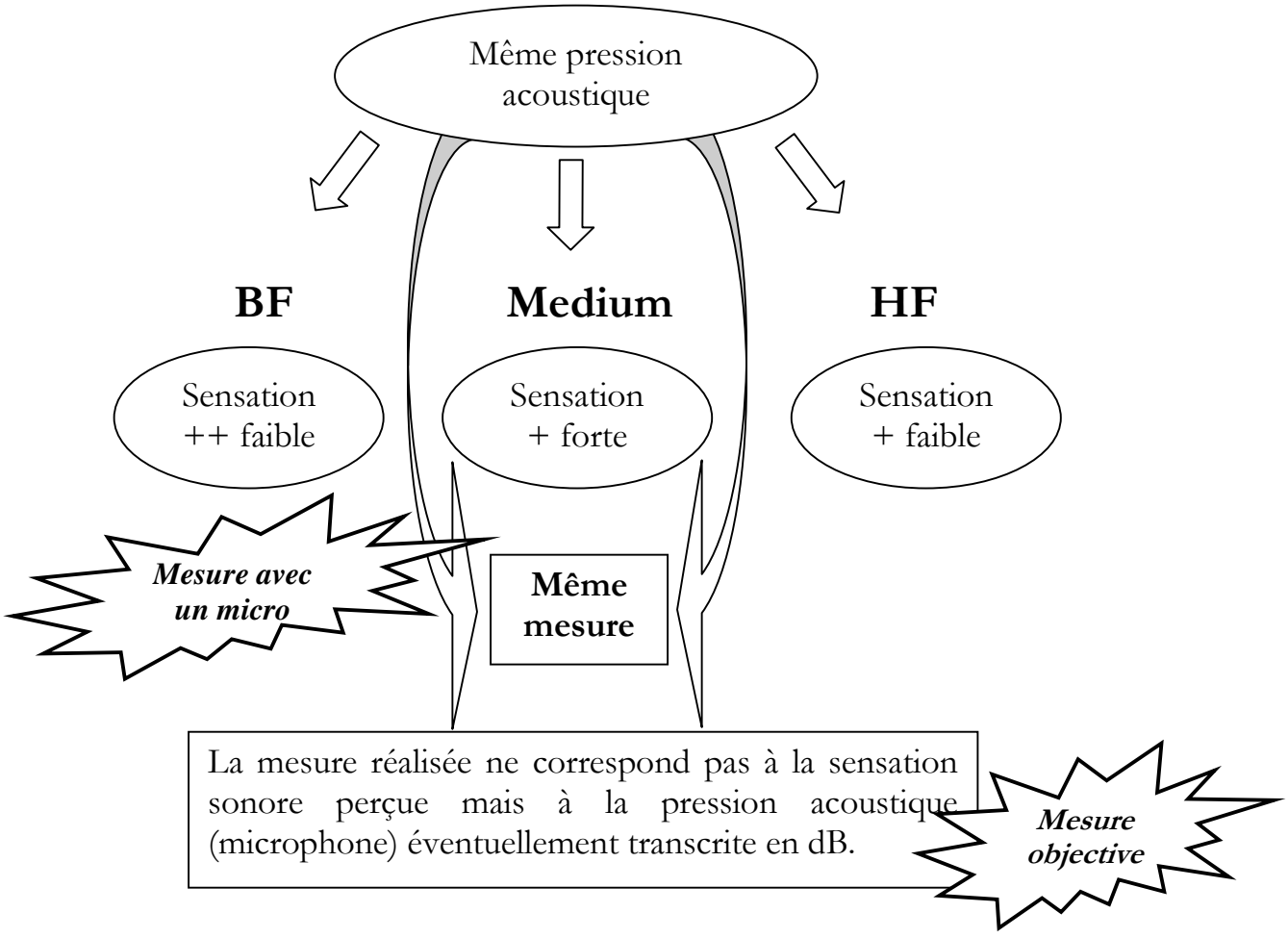
- L'oreille humaine perçoit une différence de niveau sonore à partir de 1 dB, seuil différentiel. Cela signifie qu'il est inutile de donner des niveaux sonores avec beaucoup de chiffres après la virgule !

- Un son émerge d'un bruit de fond s'il est supérieur de 15 dB du niveau du bruit.

II – LE dB PONDERE

1°/ CONSTAT

Utilisons un instrument de mesure comme un microphone pour caractériser trois sons de même pression acoustique mais de fréquence différentes :



2°/ PONDERATION

Comment réaliser une mesure subjective correspondant à la sensation sonore perçue par l'oreille humaine ?

Pour cela il faudrait :

Réduire la valeur mesurée pour les BF, ne pas corriger la mesure pour les médiums et réduire un peu la mesure pour les HF.

Quel circuit peut ainsi traiter différemment un signal en fonction de sa fréquence ?

Un tel circuit est un filtre. On l'appelle filtre de pondération. L'allure de sa réponse en fréquence devra être celle d'un filtre passe bande. Ce pourrait être un filtre électronique agissant sur le signal électrique délivré par le microphone. Ce peut-être un filtre logiciel si on réalise l'acquisition du signal par ordinateur.

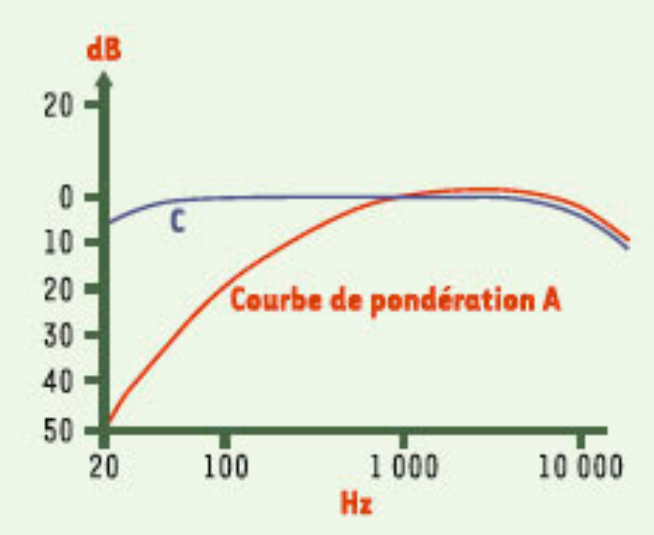
Il faudrait plusieurs filtres différents puisque la sensation sonore en fonction de la fréquence dépend du niveau !

3°/ LA NORME

La norme répond à ce problème en imposant une seule courbe de pondération quel que soit le niveau sonore.

Cette pondération est appelée pondération A. Elle est élaborée à partir de la courbe isosonique à 40 dB (niveau faible) mais doit être utilisée pour tous les niveaux sonores mesurés.

Cette courbe est normalisée : norme NF S 31-009.
Le filtre de pondération est imposé par la norme internationale IEC 61672-2003.



4°/ LE dBA

A une fréquence donnée, la valeur du niveau de pression sonore en dBA, c'est à dire niveau sonore pondéré, subjectif est donné par :

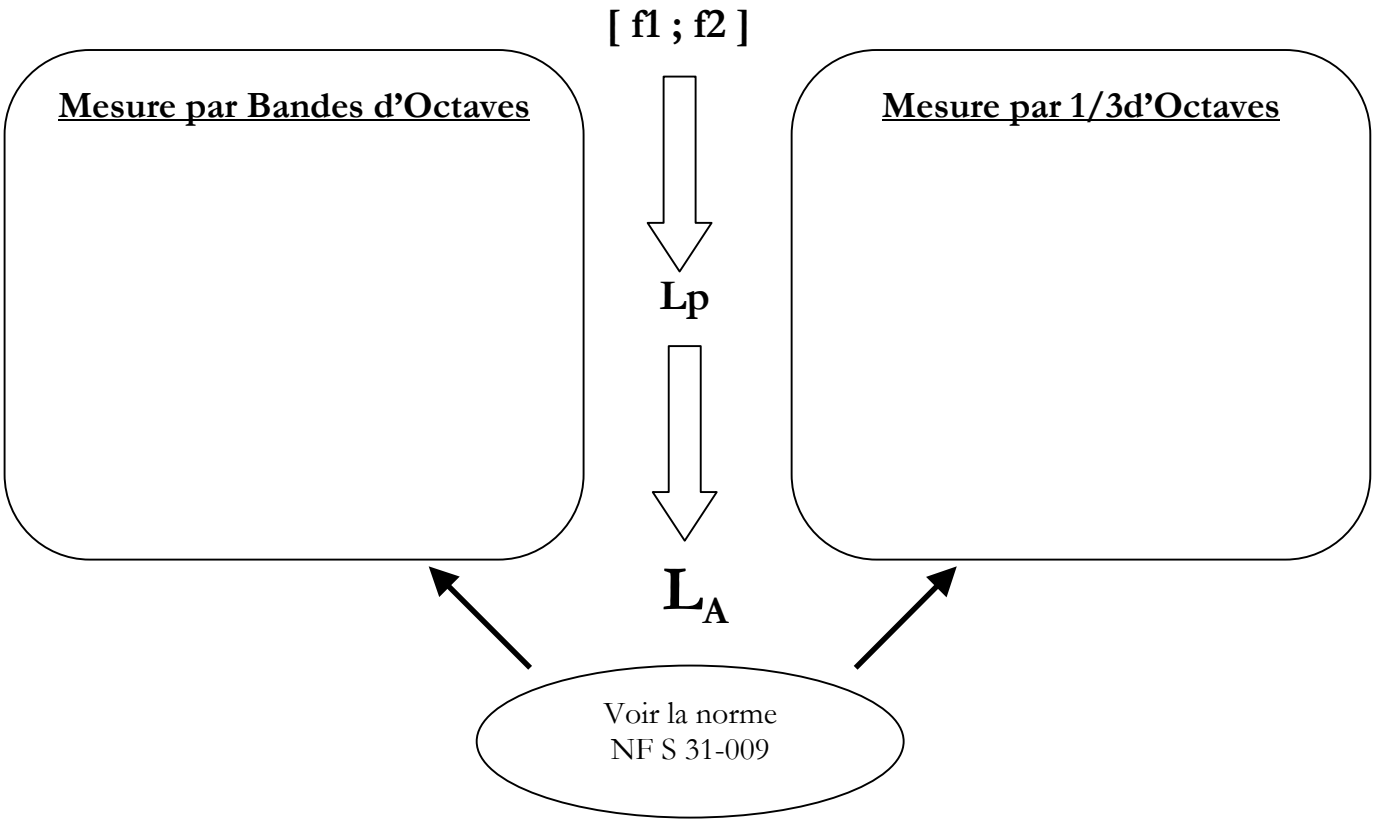
$$L_A(f) = L(f) + Pond(f)$$

- $L_A(f)$: dBA
- $L(f)$: dB SPL
- $Pond(f)$: Donné par la courbe de pondération A

Avec un sonomètre, on réalise une mesure du niveau sonore perçu par l'oreille humaine par utilisation d'un filtre de pondération A, le résultat est alors donné en dBA.

5°/ MESURE PAR BANDES D'OCTAVE

En réalité, on réalise des mesures par bandes de fréquences [f1 ; f2] desquelles on déduit une valeur.



La plage des fréquences allant de 10 Hz à 20 kHz est divisée en intervalles d'un octave ou d'1/3 d'octave. La fréquence de référence est de 1000 Hz pour laquelle la pondération sera de 0 dB. Pour chaque intervalle de fréquence, la pondération prend une valeur normalisée donnée dans le tableau ci-dessous.

Pondération A (NF S 31-009)

1/1 octave (Hz)	1/3 d'octave (Hz)	Pondération A (dB)
	10	-70,4
	12,5	-63,4
16	16	-56,7
	20	-50,5
	25	-44,7
31,5	31,5	-39,4
	40	-34,6
	44 50 57	-30,2
63	57 63 71	-26,2
	57 80 88	-22,5
	88 100 113	-19,1
125	113 125 141	-16,1
	141 160 176	-13,4
	176 200 225	-10,9
250	225 250 283	-8,6
	283 315 353	-6,6
	353 400 440	-4,8
500	440 500 565	-3,2
	565 630 707	-1,9
	707 800 880	-0,8
1000	880 1000 1130	0
	1130 1250 1414	0,6
	1414 1600 1760	1
2000	1760 2000 2250	1,2
	2250 2500 2825	1,3
	2825 3150 3530	1,2
4000	3530 4000 4400	1
	4400 5000 5650	0,5
	5650 6300 7070	-0,1
8000	7070 8000 8800	-1,1
	8800 10000 11300	-2,5
	11300 12500 14140	-4,3
16000	14140 16000 17600	-6,6
	17600 20000 22500	-9,3

6°/ EXEMPLE

Voici une série de mesure correspondant aux niveaux de pressions sonores relevés en bandes d'octaves.

f	125	250	500	1000	2000	4000
Lp SPL						
Pond A						
L_A						
$I_A = I_0 .10^{LA/10}$						

Compléter le tableau

En déduire l'intensité acoustique totale

En déduire la valeur de L_A total

III – AUTRES PONDERATIONS

Les anciennes pondérations B et D sont obsolètes, nous n'en parlerons pas.

La norme IEC décrit d'autres pondérations C et Z.

1°/ PONDERATION C

La courbe C est plus aplatie que la courbe A.
Elle correspond à la courbe iso sonique 90 dB donc à des niveaux sonores élevés.

On l'utilise surtout :

- *en BF*
- *Pour des valeurs crêtes sous estimées par la pondération A mais pouvant être dangereuses pour l'oreille.*

2°/ PONDERATION Z

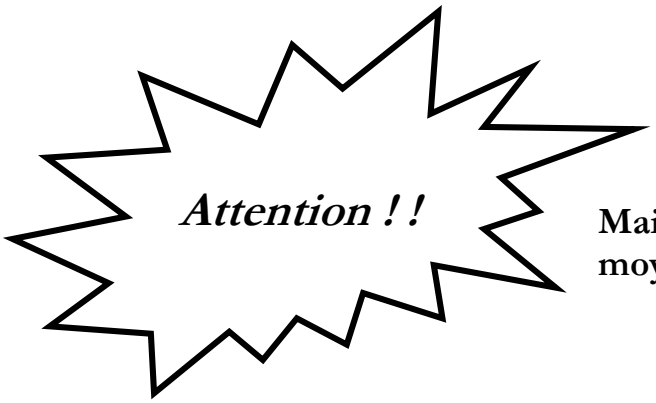
La pondération est plate entre 16 Hz et 16 kHz. On l'utilise pour des valeurs crêtes de signaux très brefs ayant donc un large spectre.

Ces deux pondérations suggèrent l'idée que la durée intervient dans l'effet du bruit sur l'homme. En effet, plus un son est intense plus il doit être bref, sous peine de lésions irréversibles.

IV – EXPOSITION SONORE

1°/ NIVEAU EQUIVALENT L_{AEQ}

L'idée est de prendre en compte la durée d'exposition au bruit en faisant une moyenne. L_{AEQ} apparaît ainsi comme le niveau continu qui aurait les mêmes effets sur l'homme ;



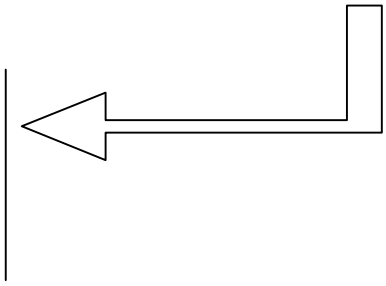
Mais il est hors de question de faire une moyenne des niveaux sonores en dB …

… ~~$L_{AEQ} = (1/T) \int L_A \, dt$~~

NON ! !

On ne moyenne pas les dB
puisqu'on ne peut pas les additionner !

Il faut revenir à l'intensité :



d'où :

2°/ MESURE DE L_{AEQ} , PONDERATIONS TEMPORELLES

A l'aide d'un sonomètre basique, il est possible de mesurer l'évolution de L_A au cours du temps, puis de calculer LAEQ « à la main » en utilisant la relation donnée ci-dessus.

Les sonomètres intégrateurs permettent de mesurer le niveau L_{AEQ} obtenu sur une période temporelle réglable. On parle alors de pondération temporelle.

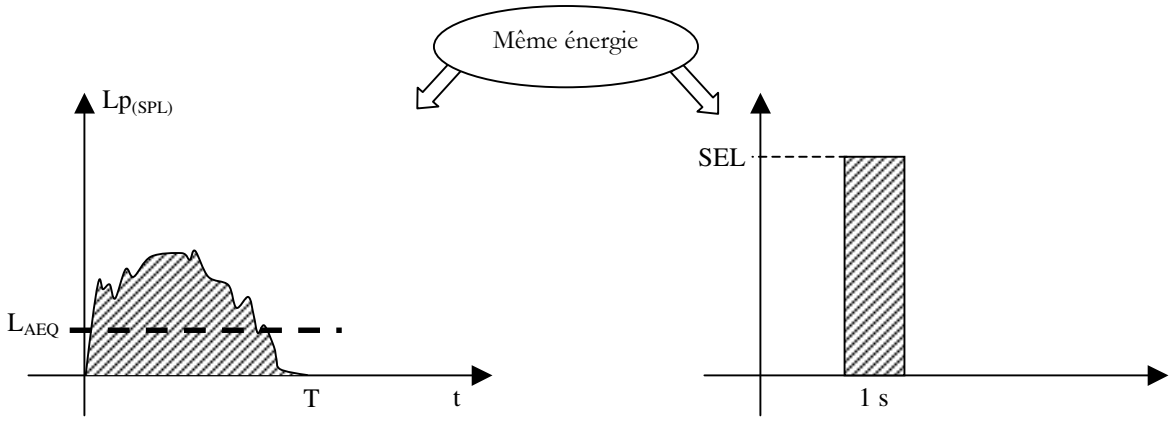
Il existe différentes pondérations temporelles fixant la durée de l'intégration :

Pondérations temporelles :

- S : Slow => T = 1s
- F : Fast => T = 125 ms
- I : Impulse => T = 35 ms

3°/ SEL

Le SEL est le niveau d'exposition acoustique. Il permet de comparer des sons de durées différentes en ramenant la mesure à une durée unique d'1s



T > 1s => SEL > L_{AEQ}
T < 1s => SEL < L_{AEQ}

Utilisé pour des mesures sur des mobiles n'ayant pas la même vitesse

Remarque : T augmente => SEL augmente

3°/ DOSES DE BRUIT $L_{ex,8h}$

a) Définition

Les conséquences du bruit sur l'homme dépendent :

- *du niveau du bruit*
- *de la durée d'exposition.*

Pour une même dose de bruit reçue, si le niveau augmente, il faut diminuer la durée.

On évalue la dose de bruit auquel est soumis un salarié en ramenant l'exposition à 8h.

On définit ainsi le niveau d'exposition correspondant sur 8h : $L_{ex,8h}$.

T est la durée d'exposition du salarié
L_{Aeq} est le niveau mesuré pendant cette durée T

b) Exemple

Un salarié exposé à 90 dB pendant 4h ⇔ une exposition sur 8h de :

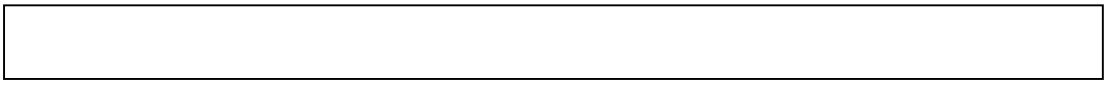
Un salarié exposé à 90 dB pendant 10h ⇔ une exposition sur 8h de :

c) Remarque : $T < 8 \Rightarrow L_{ex,8h} < L_{Aeq}$ et $T > 8 \Rightarrow L_{ex,8h} > L_{Aeq}$

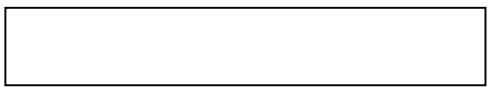
d) Cas de plusieurs expositions différentes

Si le salarié est exposé à : L_{A1} pendant T_1 puis L_{A2} pendant T_2 puis L_{A3} pendant T_3

On calcule le niveau d'exposition sonore sur la durée totale $T = T_1 + T_2 + T_3$



Puis on ramène la durée à 8h :



4°/ REGLEMENTATION (Résumé)

On procède aux mesures des deux paramètres acoustiques LEx,8h et Lpc (Niveau sonore de crête mesuré avec application de la pondération C).

Les niveaux mesurés sont à comparer à des seuils réglementaires :

- *un seuil inférieur d'action : LEx,8h = 80 dBA ou Lpc = 135 dBC*
- *un seuil supérieur d'action : LEx,8h = 85 dBA ou Lpc = 137 dBC*
- *une valeur limite d'exposition. LEx,8h = 87 dBA ou Lpc = 140 dBC*

LEx,8h < 80 dBA et Lpc < 135 dBC

Pas de mesures spéciales

80 dBA ≤ LEx,8h < 85 dBA ou 135 dBC ≤ Lpc < 137 dBC

L'employeur doit :

- mettre à disposition des travailleurs des protections individuelles contre le bruit (casque antibruit, bouchons d'oreille)
- information et formation à la problématique du bruit
- proposition d'un examen auditif
- consultation des représentants des travailleurs.

85 dBA ≤ LEx,8h ou Lpc ≥ 137 dBC

L'employeur impose :

- Le port de protections individuelles
- La mise en place d'une signalisation sur les lieux à risque
- Une surveillance médicale renforcée de ses employés.
- Des mesures techniques ou organisationnelles qui visent à réduire l'exposition au bruit (choix et agencement des machines, traitement acoustique des locaux,

Les valeurs limites d'exposition ne peuvent être dépassées en aucun cas.
Les valeurs limites tiennent compte de l'atténuation apportée par d'éventuelles protections individuelles contre le bruit.

http://www.travailler-mieux.gouv.fr/Bruit-en-milieu-de-travail.html
http://www.legifrance.gouv.fr/jopdf/common/jo_pdf.jsp?numJO=0&dateJO=20060720&numTexte=14&pageDebut=10905&pageFin=10908