Définition

Acoustik = sciences des sons

Son = perturbat° propage fluide
+ perçu / oreille
analysé / cerveau

Oreille = capteur pression dynamik

Pression = F/S exercé / gaz (Pa)

Mécanisme d'audition

Oreille externe : analyse NRJ
interne : transforme NRJ méca → élec
moyenne " NRJ acoustik → méca

Pression - Niveau pression

$$\boxed{L_{p\,(dB)} = 10 \log (|I| / I_{ref})} \quad I_{ref} = 10^{-12}\ W.m^{-2}$$

$$L_p = 10 \log (P_{eff}^2 / P_{ref}^2) \quad P_{ref} = 2 \times 10^{-5}\ Pa$$

$$P_{eff}^2 = \frac{1}{T} \int_T p^2\, dt \quad (Pa^2) = \rho_0 c_0 |I|$$

Niveau pression global

$$L_{pg} = 10 \log \sum 10^{L_{pi}/10} \ (dB)$$

* Référence : $P_0 = 1\ bar = 10^5\ Pa$
$v_{ref} = 5 \times 10^{-8}\ m.s^{-1}$
$c_{son} = 340\ m.s^{-1}$
$\rho_0 = 1{,}2\ kg.m^{-3}$

Filtre A

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
α	-16	-8,5	-3	0	1	1

$$L_{pg} = 10 \log \sum 10^{\frac{L_{pi} - \alpha_i}{10}}$$

Eq fondamentale

- Conservat° qté mvt (Euler)
$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = -\nabla p$$
- Conservation masse
$$\rho_0 \nabla v = -\frac{\partial \rho'}{\partial t}$$
- Comportement fluide adiabatique
$$p = \rho' c_0^2$$

* Équation d'onde

$$\boxed{\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{d^2 p}{dt^2} = 0} \quad k^2 = \frac{1}{c^2}$$

Helmotz : $\nabla^2 p + k^2 d_p^2 A t^2 = 0$

$$p = \underbrace{f^+(t - \tfrac{x}{c})}_{\text{progressive}} + \underbrace{f^-(t + \tfrac{x}{c})}_{\text{regressive}} = e^{j\omega t}(Ae^{-jkx} + Be^{jkx})$$

p : surpression ρ' : variat° masse volumik
$c_0 = 340\ m.s^{-1}$ $k = \omega / c_0 = 2\pi / \lambda$ $\rho_0 = 1{,}2\ kg.m^{-3}$

Densité spectrale de puissance

$$G_{pp}(f) = \lim_{T \to \infty} \frac{2}{N} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} |\hat{p}(f,T)|^2 \ (Pa^2/Hz)$$

Impédance acoustique

$$Z(M,t) = p(M,t) / (\vec{v}(M,t)\ \vec{n}(M))$$

si plan → $\frac{p}{v} = \rho_0 c_0 \sim 400\ kg.s^{-1}.m^{-2}$

Source acoustique

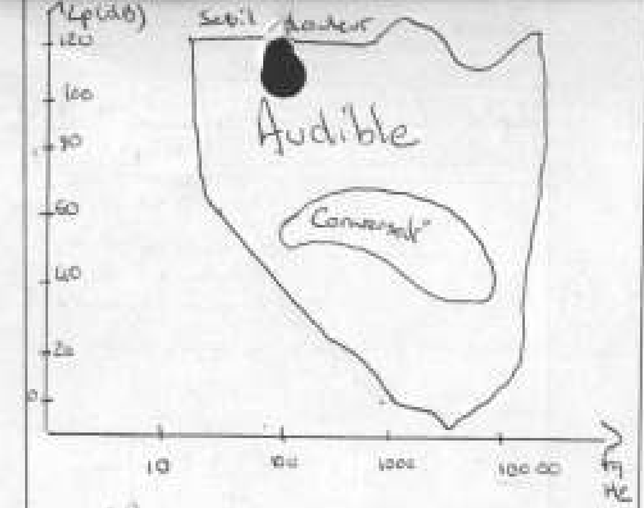
qualifié par : spectre puissance // fq
directivité

$$W = \int_S \vec{I}(M) . \vec{n}\, dS$$

$$\boxed{L_w = 10 \log (W / W_{ref})} \ (dB) \quad \text{Niveau de Puissance}$$

$W_{ref} = 10^{-12}\ W$

$$I = \frac{1}{T} \int_T p \times v$$



Définition - Hypothèse

Transversale
Longitudinale
$$v = \frac{p}{\rho_0 c_0}$$
$u = v / 2\pi f$
↳ déplacement

- parfait
- homogène
- adiabatique
- au repos initialement
- petit perturbat° ↳ acoustik linéaire

Harmoniques - Fondamentale

$$p(t) = \int_R \hat{p}\, e^{2\pi f t} df \qquad \hat{p} = \int_R p(t) e^{-2\pi f t} dt$$

$$c_0 = \sqrt{\gamma \frac{P_0}{\rho_0}} = \sqrt{\gamma R T_0} \qquad R = 287{,}5 \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1{,}4$$

$$c_0 = 20{,}05 \sqrt{T(K)}$$

Type	Gaz	Fluide	Solide
c	$\sqrt{\gamma \frac{P_0}{\rho_0}}$	$\sqrt{K/\rho_0}$	$\sqrt{E/\rho_0}$

Équation d'onde en fct° géométrie

Plan
$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$
$Z = \rho_0 c_0$

Sphérique
$$\nabla^2 p = \frac{1}{r} \partial^2 rp / \partial r^2$$
$$\hookrightarrow \frac{\partial^2 rp}{\partial r^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \frac{\partial^2 rp}{\partial t^2} = 0$$
$p = \frac{1}{r}(f^+ + f^-)$ $Z = \frac{\rho_0 c_0}{1 + j/kr}$

Somme de bruit

$$p_{eff}^2 = p_{1\,eff}^2 + p_{2\,eff}^2 + \frac{1}{T} \int_{[T]} 2 p_1 p_2$$

Si bruit corrélé $\int p_1 p_2 = 0$
bruit cohérent / non cohérent : +3dB

Loi de Bouger-Werber

$\frac{\Delta f}{f} = 0{,}003$ bruit detecté

Octave - 1/3 Octave

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{f_{i+1} - f_i}{f_{centrale\ i}} \rightarrow f_{ci} = \sqrt{f_i f_{i+1}}$$

Octave $f_{i+1} = 2 f_i \quad f_{c\,i+1} = 2 f_{ci}$

1/3 octave $f_{i+1} = 2^{1/3} f_i \quad f_{c\,i+1} = 2^{1/3} f_{ci}$

* **Bruit blanc** : $L_p / f_q = cst$
L_p / octave ↗ 3dB/oct

* **Bruit rose** :
$L_p / f_q \searrow 3dB$/décade L_p/oct = cst

Approche Ondulatoire

plan ∞ en 0 et L (CI : v = 0)

$f_n = nc / 2L$

3D loi Rayleigh $f_{pqr} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{r^2}{c^2} + \frac{q^2}{\ell^2} + \frac{r^2}{\ell^2}}$
axial / tangenciel / oblique

Nombre de modes :

$$\frac{4}{3} \frac{\pi}{c^3} V f^3 + \frac{\pi S}{2c^2} f^2 + \frac{L}{c} f + 1 \qquad L = 4(L_x + L_y + L_z)$$

* **Champ modal** :
→ nb modes ↘ en basse fq

* **Champ diffus**
→ nb modes ↗ en haute fq

1/3 octaves, fq centrale

12,5 · 16 · 20 · 25 · 31,5 · 40 · 50 · 63 · 80/100 · 125 · 160 · 200 · 250 · 315 · 400 · 500 · 630 · 800 · 1000 · 1250 · 1600 · 2000 · 2500 · 3150 · 4000 · 5000 · 6300 · 8000 · 10 000 · 12 500 · 16 000 · 20000 · 25000 · 31500 · 40 000

Correction acoustique

= source + recepteur ds local

Statistique : champ diffus ds NRS acoustik en tt pt. $-dE = dt/\tau$

Etablissement son $E = E_{max}(1 - e^{-t/\tau})$

Extinct $E = E_{max}\, e^{-t/\tau}$

Temps reverbent : 60dB - tps tq $E_i/E_f = 10^6$

$$\boxed{T_r = \frac{0{,}16\,V}{A}\ (s)}$$ form Sabine

A : aire absorb. $A = \sum \alpha_i S_i$ m²

$\alpha_i = \frac{P_{uis\ dissipe}}{P_{uis\ incidente}}$

α_{moyen} (coef absorbt) $= \frac{\sum \alpha_i S_i}{\sum S_i} \Rightarrow A = \alpha_{moy} \times S$

(formule Eyring : $T_r = 0{,}16 V / -S \ln(1-\alpha_m)$)

Isolation

source + recepteur separe $= \{$ moyen + dispositif / transmission NRS

Isolemt gd physik pr paroi + environnemt

- brut : $D = L_1 - L_2$ (dB)
- normalisé : $D = L_1 - L_2 + 10\log(T_r/T_0)$

$T_0 = 1\,s$ école, $T_0 = 0{,}5\,s$ habitat

Indice d'affaiblissement $\boxed{R = 10 \log \tau}$

$\tau = \frac{I_{transmit}}{I_{incident}}$ $R\nearrow$ si performance $\nearrow$

R dep : fq, type champ (diffus), angle, OPM

* Pr 1 paroi composite

$$\boxed{\tau = \sum \tau_i S_i / \sum S_i}$$

$R = L_{emi} - L_{reçu} + 10 \log(S_{paroi}/A_{aire\ eq})$

Rigidité flexion

$D = B = Eh^3 / 12(1 - \nu^2)$ (E : Young, h : epaisseur, ν : poisson)

Relat° Pression - Puissance

Niv pression

$$\boxed{L_p = L_w + 10 \log\left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4(1-\alpha)}{A}\right)}$$

L_w : niv puissance ; direct ; reverberé

Q=1 champ libre, Q=2 : surface, Q=4 arrete, Q=8 coin

α : coef absorbt° moyen des materiaux (en general $\alpha \ll 1$)

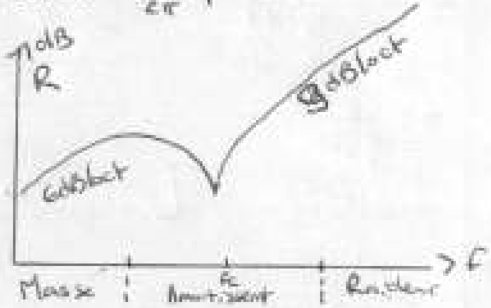
champ reverberé $I = W\,4/A$

Loi de Masse - 1 paroi

$$R \simeq 10 \log\left(1 + \left(\frac{2\pi f M}{2\rho_0 c_0}\right)^2\right) - 5$$

(champ diffus) M masse surfacik

$$f_{critik} = \frac{c^2}{2\pi}\sqrt{M_S/B}$$



Si $k = \omega M_S \cos\theta / 2\rho_0 c_0$ (θ ang incidence)

- Loi masse $R = 10\log(1+k^2)$
- elastik $R = 10\log(1 + k^2(1 - f^2/f_c^2)^2)$
- amortisst $R = 10\log\left(1 + \frac{\eta k f^2}{f_c^2} + k^2(1 - \frac{f^2}{f_c^2})^2\right)$

η = tan δ : decalage contrainte deplacement

$k_f = \left(\frac{\omega^2}{B}\rho_S\right)^{1/4}$ celerite onde flexion

Autre

Sce pulsante $W = \frac{\rho_0 c_0 S}{1 + \left(\frac{\lambda}{2\pi a}\right)^2}\, 4\pi r_0^2 v_{eff}^2$

Si r ✗2 : 6dB : distance ×2

$\alpha = \frac{E_{abs}^{refl} + E_{transm}}{E_i}$ $\quad \alpha = E_{ab}/E_i = 1 - |R|^2$

$R = P_r / P_i$

$Z_n = \frac{P}{V_n}$

Fixé / ouvert $R_n = 1C$ et $R_n = Ctr$

Materiau absorbant resonateur $f = 60/\sqrt{md}$

Helmoltz $f = \frac{c}{2\pi}\sqrt{S/lV}$

Paroi double (sys masse ressort)

$$\boxed{f_{resp\,int} = f_0 = \left(\frac{k}{4\pi^2}\left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}\right)\right)^{1/2}}$$

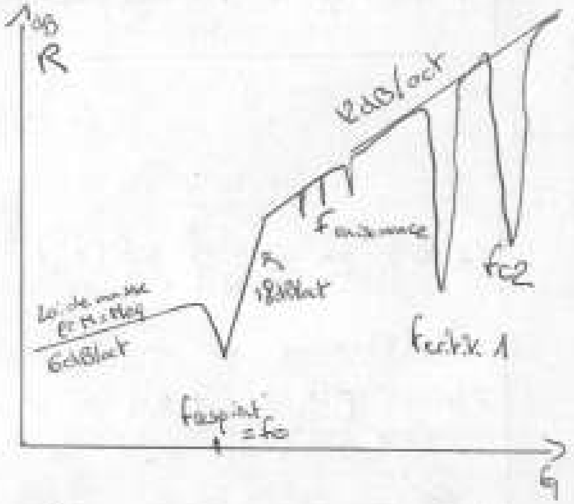
K = raideur N.m⁻¹ $\left\{\begin{array}{l} \text{Air} : K = \rho_0 c_0^2 / e \\ \text{Materiau} : K = E/e \end{array}\right.$

Pr l'air $f_0 = 80\sqrt{1/dM}$; e : espacemt entre parement

$\frac{1}{M_{eq}} = \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}$

$$\boxed{f_{critik} = \frac{c_0^2}{2\pi}\sqrt{\frac{M_S}{B}}}$$ (calcul pr chaque parement)

$f_{resonance} = n c_0 / 2e$



Dimensionner une paroi double

- f_0 bas — parement dissymetrik pr $f_c \neq f_c$
- f_c haut — garnir absorbant souple
- condit° montage souple

Ex : si espacemt ×2 ⇒ $f_{res}' = \frac{f_{resp}}{\sqrt{2}}$

si $M_S \times 2$: $f_c' = \frac{f_c}{2}$ $f_{res}' = \frac{f_{resp}}{\sqrt{2}}$

Si parement 2 nature : $f_{c1} \neq f_{c2}$

1 seul pic mais très afaibli

Isolement aerien

$D_{nat} = R + 10 \log(0{,}16 V / S\, T_0)$

Avec $a = S + S_c / l_0 - N$

$D_{nat} = 10 \log\left(0{,}32 V / \sum S_i\, 10^{-0{,}1R_{facade}} + \sum S_{lat}\, 10^{-0{,}1(R+10)} + \sum 10^{-(D_{ne}+\dots)}_{entrée\ d'air}\right)$

Choc : L_n / L_{nt} $= L_p - 10 \log(T_r/T_0)$

$\Delta L = L_{no} - L_n$ (sans revetmt / ac revetmt)

Si $\Delta L \nearrow$, performance $\nearrow$

2° Partie

Correct° acoustique (interieur local) → champ diffus

Sabine $T_r = 0{,}16 V / \sum \alpha_i S_i$

3° partie

$W = \int I n\, dS$ si $I = cst$ $W = IS$

Niveau puissance $L_w = 10 \log(W/W_0)$

Relat° Pression-Puissance direct négligé si $r > 2m$

$\alpha \sim 1$ et champ libre reverbé négligé

$P_{eff}^2 = \frac{1}{T}\int_0^T p^2\, dt$

4° partie

vitrage $R = 10\log(1/\tau)$ $\tau = \frac{I_t}{I_i}$

$L_p = 10 \log(I/I_0)$

double vitrage BF ⊕ 2 masses ressort

Niveau ×120 dB = pb

Correction
(Source et récepteur dans le même local)

Temps de réverbération (formule de Sabine) $Tr = \frac{0.16V}{A}$ en seconde
(durée de décroissance du niveau de bruit de 60 dB)

Aire d'absorption équivalente $A = \sum_i \alpha_i S_i$ m^2

Coefficient d'absorption α = $\frac{\text{Puissance dissipée}}{\text{Puissance incidente}}$ Cet indicateur n'est pas symétrique

S Surface de traitée par chaque matériau

Coefficient d'absorption moyen : $\overline{\alpha} = \sum_i \alpha_i S_i / \sum_i S_i$

Isolation (ne pas confondre avec isolement)
(Source et récepteur séparés par une paroi)

Indice d'affaiblissement acoustique $R = -10\log(\tau)$ en dB
(Transmission Loss - TL - en anglais)

Transparence acoustique τ = $\frac{\text{Puissance transmise}}{\text{Puissance incidente}}$ Cet indicateur est symétrique

Pour une paroi composite : $\tau = \frac{\sum_i \tau_i S_i}{\sum_i S_i}$

Relation pression - puissance

$$L_p = L_W + 10\log\left(\underbrace{\frac{Q}{4\pi r^2}}_{\text{Champ direct}} + \underbrace{\frac{4(1-\alpha)}{A}}_{\text{Champ réverbéré}} \right)$$

Niveau de pression (mesuré au sonomètre)

Niveau de puissance de la source

facteur de directivité de la source

Distance source à récepteur

Coeff. d'absorption moyen des matériaux de la salle (souvent négligé par rapport à 1)

Champ réverbéré (non nul si on est dans un espace clos)

Q = 1 : source en champ libre
Q = 2 : source près d'une surface parfaitement réfléchissante
Q = 8 : souce dans le coin d'une pièce (parois réfléchissantes)

Isolement (la paroi dans son environnement)

Isolement standardisé entre deux locaux : $D_{nT} = L_p^E - L_{p,n}^R = D_b + 10\log\left(\frac{Tr}{T_{ref}}\right)$

Valeurs fixées par arrêtés sont : $R_w + C$ et $R_w + C_{tr}$

Recommandations pour dimensionner une paroi double

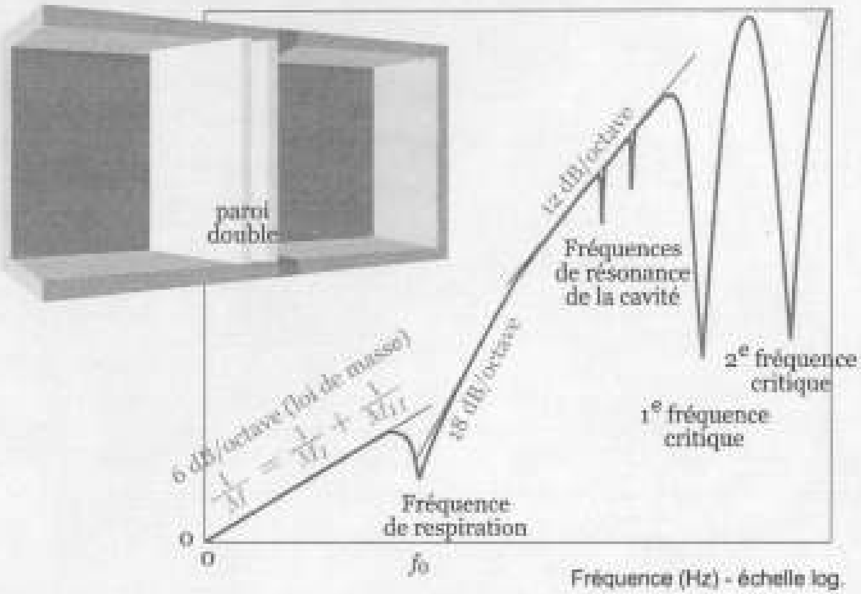
- définir f_0 le plus bas en fréquence
- définir f_c les plus hautes en fréquence
- utiliser des parements dissymétriques
- garnir la cavité d'un absorbant souple
- assurer des conditions de montage souples (attention aux montants)

Loi de masse conditions de champ diffus $R(f,M) \simeq 10\log\left[1 + \left(\frac{2\pi f M}{2\rho_0 c_0}\right)^2\right] - 5$
(Pour une plaque mince)

M : masse surfacique du parement (kg.m^{-2})

Paroi double (2 parements)

Allure de l'Indice d'affaiblissement d'une paroi double en champ diffus (dB)



Fréquence de respiration : $f_0 = \sqrt{\frac{K}{4\pi^2}\left(\frac{1}{M_I} + \frac{1}{M_{II}}\right)}$ si rempli d'air : $K = \frac{\rho_0 c_0^2}{e}$
si rempli du matériau souple : $K \approx \frac{E}{e}$

K : raideur du garnissage entre les parements (N.m^{-1})

M_I : masse surfacique d'un des deux parements

M_{II} : masse surfacique du second parement

Pour de l'air aux cdts ambiantes de température et de pression : $f_0 \simeq 80\sqrt{\frac{1}{dM}}$

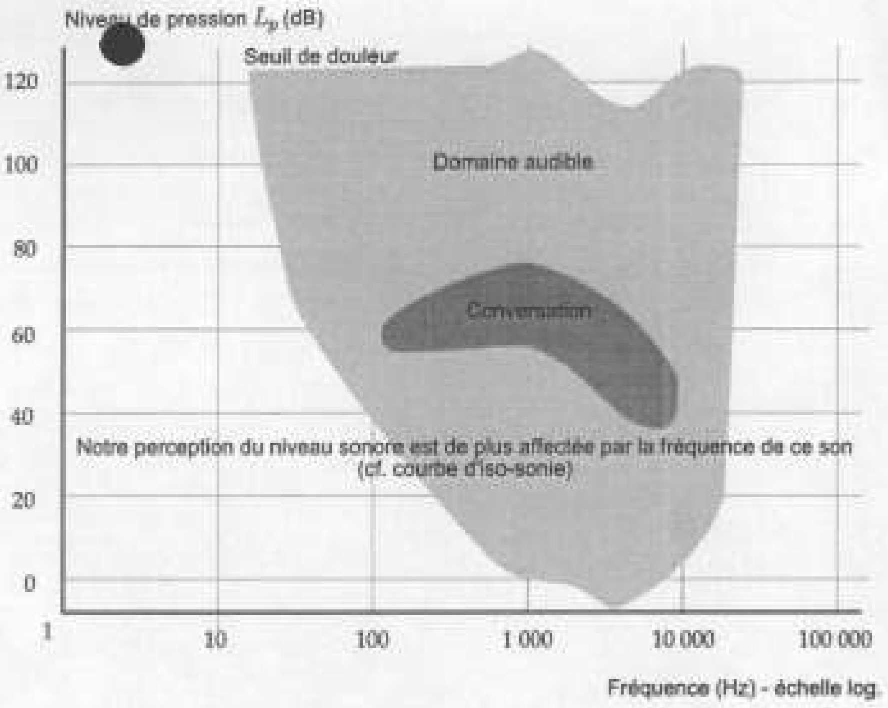
$\frac{1}{M} = \frac{1}{M_I} + \frac{1}{M_{II}}$: masse surfacique équivalente des deux parements

e : espacement entre les parements (en mètres)

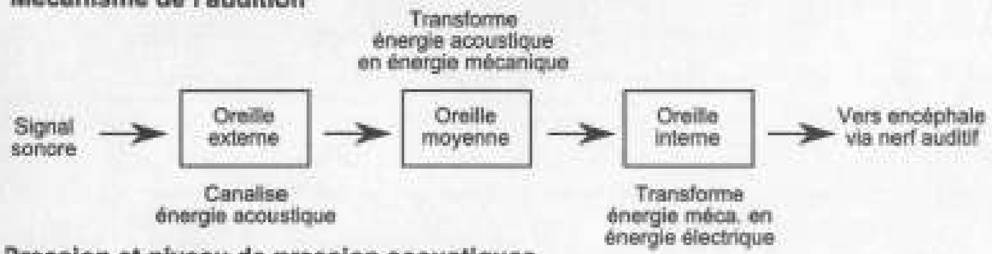
Fréquence cr[illegible]e : $f_c = \frac{c_0^2}{2\pi}\sqrt{\frac{M}{B}}$ à calculer pour chaque parement

Définitions

Acoustique	science des sons
Son	perturbation se propageant dans un fluide (gaz, liquide) perçue par l'oreille et analysée par le cerveau
Oreille	capteur de pression dynamique (ou microphone)
Capteur	système convertissant grandeur physique en grandeur électrique
Pression	force par unité de surface exercée par un gaz sur une surface. S'exprime en Pascal (Pa)
Dynamique	par opp. à statique (un baromètre mesure la pression statique ou pression atmosphérique). Un microphone détecte des fluctuations de pression



Mécanisme de l'audition



Pression et niveau de pression acoustiques

$L_p = 10\log\frac{|\mathbf{I}|}{I_{ref}} = 10\log\frac{p_{eff}^2}{p_{ref}^2}$ (dB) $\qquad p_{eff}^2 = \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} p(M,t)^2 dt$ (Pa^2)

$p_{ref} = 2\cdot 10^{-5}$ Pa, $I_{ref} = 10^{-12}$ W.m^{-2} $\qquad T$ période en seconde

$L_{pg} = 10\log\sum_i 10^{L_{pi}/10}$ (niveau global en dB)

	[125	250	500	1000	2000	4000] Hz
Filtre de pondération A :	[-16	-8.5	-3	+0	+1	+1]

Densité spectrale de puissance

$$G_{pp}(f) = \lim_{T\to+\infty}\frac{2}{N}\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}|\hat{p}(f,T)|^2 \quad (\mathrm{Pa}^2/\mathrm{Hz})$$

Equations fondamentales de l'acoustique linéaire

Equation de conservation de la quantité de mvt (Euler)	$\rho_0\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla p$
Equation de conservation de la masse	$\rho_0\nabla\cdot\mathbf{v} = -\frac{\partial\rho'}{\partial t}$
Equation de comportement du fluide (transformations adiabatiques et réversibles i.e. isentropiques)	$p = \rho' c_0^2$

p surpression acoustique

$\mathbf{v}$ vitesse particulaire

ρ' variation de masse volumique due à la perturbation acoustique

ρ_0 masse volumique de l'air au repos $\sim 1.2\ \mathrm{kg.m^{-3}}$

c_0 célérité du son dans l'air $\sim 340\ \mathrm{m.s^{-1}}$

$k = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi}{\lambda}$ nombre d'onde

ω pulsation $(\mathrm{rad.s^{-1}})$

λ longueur d'onde

Equation d'onde de la surpression acoustique (en l'absence ou en dehors de sources)

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad\longrightarrow\quad p(x,t) = f\left(t-\frac{x}{c_0}\right) + g\left(t+\frac{x}{c_0}\right)$$

Forme des solutions

Equation d'Helmholtz (dépendance en temps de la forme $e^{\pm j\omega t}$)

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad\longrightarrow\quad p(x,\omega) = (Ae^{-jkx} + Be^{+jkx})e^{j\omega t}$$

Impédance acoustique

$$Z(M,t) = \frac{p(M,t)}{\mathbf{v}(M,t)\cdot\mathbf{n}(M)}$$

Sources acoustiques

Une source se qualifie par
- son spectre de puissance en fréquence
- sa directivité

Puissance W et niveau de puissance Lw

$W = \int_S \mathbf{I}(M)\cdot\mathbf{n}dS$

$W_{ref} = 10^{-12}$ Watt

$Lw = 10\log\frac{W}{W_{ref}}$

Le vecteur intensité est défini comme

$$\mathbf{I} = \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} p(M,t)\cdot\mathbf{v}(M,t)dt$$

Fréquences centrales d'octave et de 1/3 d'octave (Hz)

16 31.5 63 125 250 500 1000 2000 4000 8000 16000 31500

12.5 16 20 25 31.5 40 50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000 2500 3150 4000 5000 6300 8000 10000 12500 16000 20000 25000 31500 40000