

# Impédance acoustique, initiation. 1/14

(accueil et réglages, 10 min)

## Les 4 formules du professeur Impédance

(35 min, avec questions-réponses)

- *Impédance électrique (bobine d'un haut-parleur)*
- *Impédance mécanique (suspensions d'un haut-parleur)*
- *Impédance acoustique (impédance caractéristique de l'air)*
- *Impédance thermique (température à un transistor de puissance)*

## Impédances Acoustiques dans nos systèmes

(45 min, avec questions-réponses)

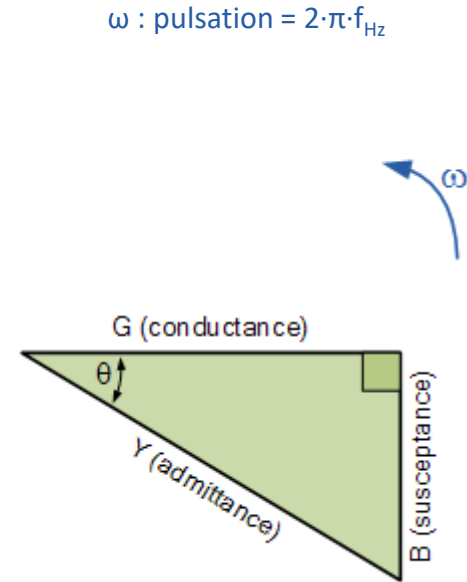
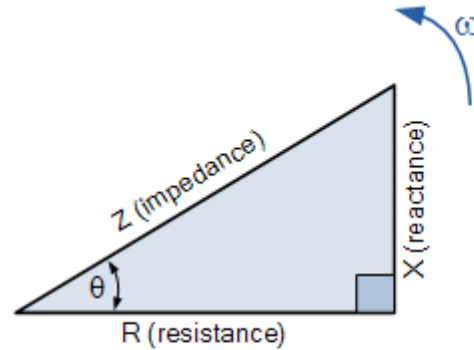
- *A un haut-parleur à rayonnement direct (suivant la surface émissive)*
- *A une enceinte multivoies (cohérence en rayonnement)*
- *A un haut-parleur à pavillon (adaptation d'impédance)*
- *A l'isolation acoustique (coefficients de transmission et de réflexion)*
- *Au traitement acoustique (réflexion diffuse et absorptions)*

# Impédance acoustique, initiation. 2/14

## Angle de vue et vocabulaire associé

- Impédance pour circuit en série (loi des mailles)
- Admittance pour circuit en parallèle (loi des nœuds)

- Résistance, siège d'une puissance active
- Réactance, siège d'une puissance réactive
- Impédance, à l'image de la puissance apparente
  
- Quel que soit le domaine : électrique, mécanique ou acoustique



<https://www.electronics-tutorials.ws/accircuits/parallel-circuit.html>

# Impédance acoustique, initiation. 3/14

## Impédance électrique (bobine d'un haut-parleur)

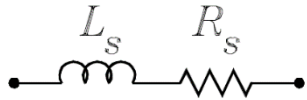
$$Z_e(j\omega) := \frac{v(j\omega)}{i(j\omega)}$$

en Ohms

Georg Simon Ohm (1789-1854) :  $I=U/R$

$$Z_e(j\omega) := R_e + j \cdot L_e \cdot \omega + Bl^2 \cdot Y_m(j\omega)$$

le 3<sup>ème</sup> terme est l'impédance motionnelle



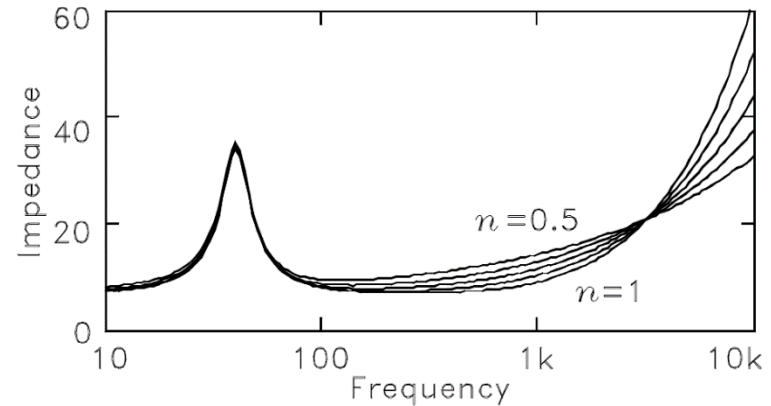
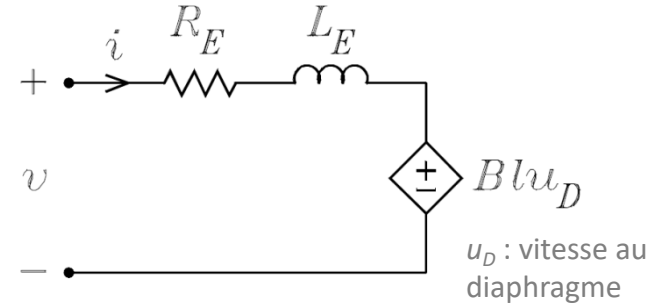
**: equivalent circuit of the lossy inductor  $L_E$  :**

- For  $n = 1$ ,  $R_s = 0$  and  $L_s$  is independent of  $\omega$ .
- For  $n = 0$ ,  $L_s = 0$  and  $R_s$  is independent of  $\omega$ .
- Pour  $0 < n < 1$ , on peut parler de "semi-inductance".

$$R_s = K\omega^n \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right)$$

$$L_s = K\omega^{n-1} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right)$$

<http://leachlegacy.ece.gatech.edu/papers/vcinduc.pdf>

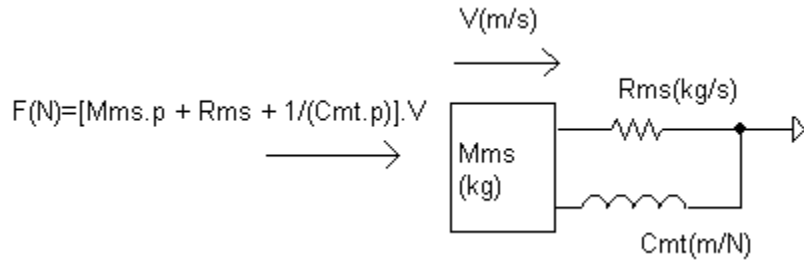


# Impédance acoustique, initiation. 4/14

## Impédance mécanique (suspensions d'un haut-parleur)

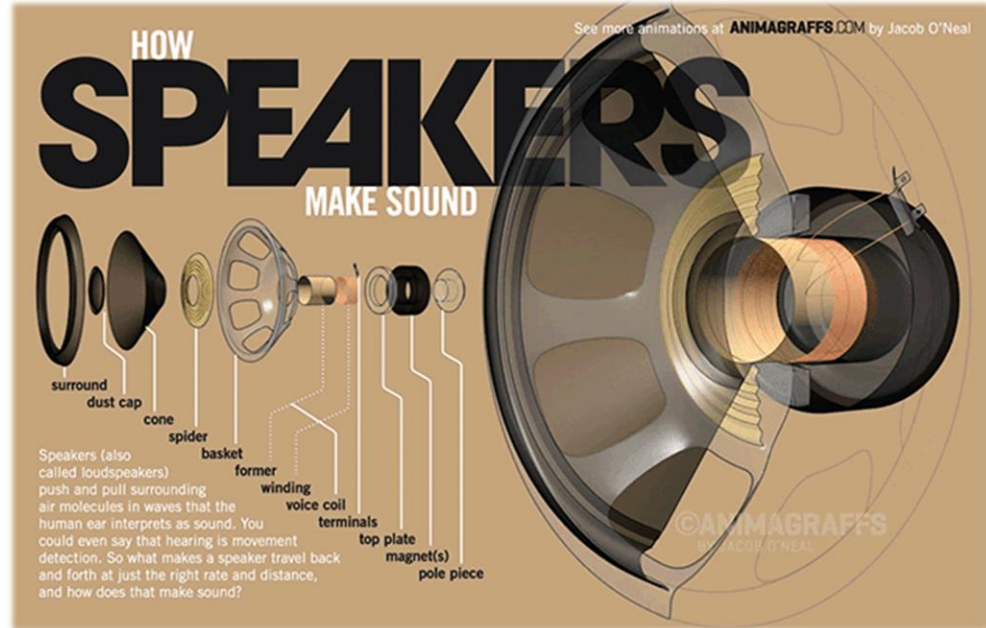
$$Z_m(j\omega) := \frac{\text{Force}(j\omega)}{\text{Vitesse}(j\omega)}$$

en Newton · seconde / mètre  
ou en kg/s



- Rms : résistance mécanique aux suspensions
- Mms : masse de l'équipage mobile
- Cmt : compliance aux suspensions mécaniques et acoustique (compliance = inverse de la raideur)

$$Z_m(j\omega) := Rms + j \cdot Mms \cdot \omega + \frac{1}{j \cdot Cmt \cdot \omega}$$



<https://www.presse-citron.net/app/uploads/2014/12/lcafo58pucnitnigxkci.gif>

# Impédance acoustique, initiation. 5/14

## Impédance acoustique (impédance caractéristique de l'air)

$$Z_a(j\omega) := \frac{\text{Pression}(j\omega)}{\text{Débit}(j\omega)} \quad \text{en Newton} \cdot \text{seconde} / \text{mètre}^5$$

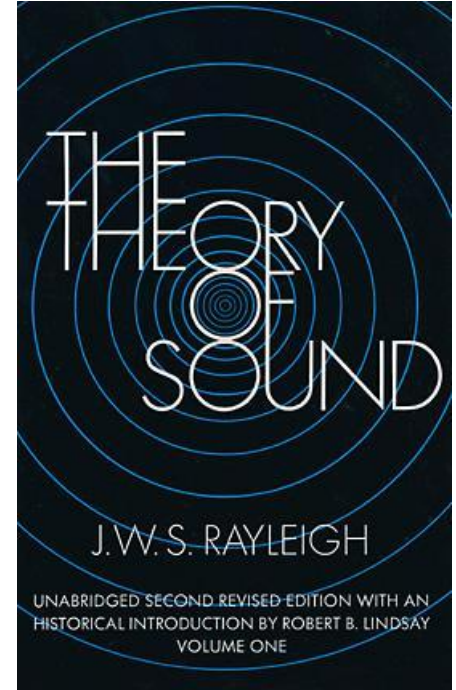
$$\rho_{\text{air}} := 1,18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad c_{\text{air}} := 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Z_{\text{air}} := \rho_{\text{air}} \cdot c_{\text{air}} = 401 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} \quad \text{ou en Rayls}$$

Lord Rayleigh (1842–1919)

Environ 1480 Rayls pour l'eau

- On devine que lorsqu'il s'agira d'une impédance de rayonnement à un transducteur, la surface du diaphragme  $S_d$  en  $\text{m}^2$  sera en lien d'unités.
- On pourra aussi étudier le rayonnement sur un point de vue mécanique, alors  $Z_{mr} = Z_r \cdot S_d^2$ .



<https://store.doverpublications.com/0486602923.html>

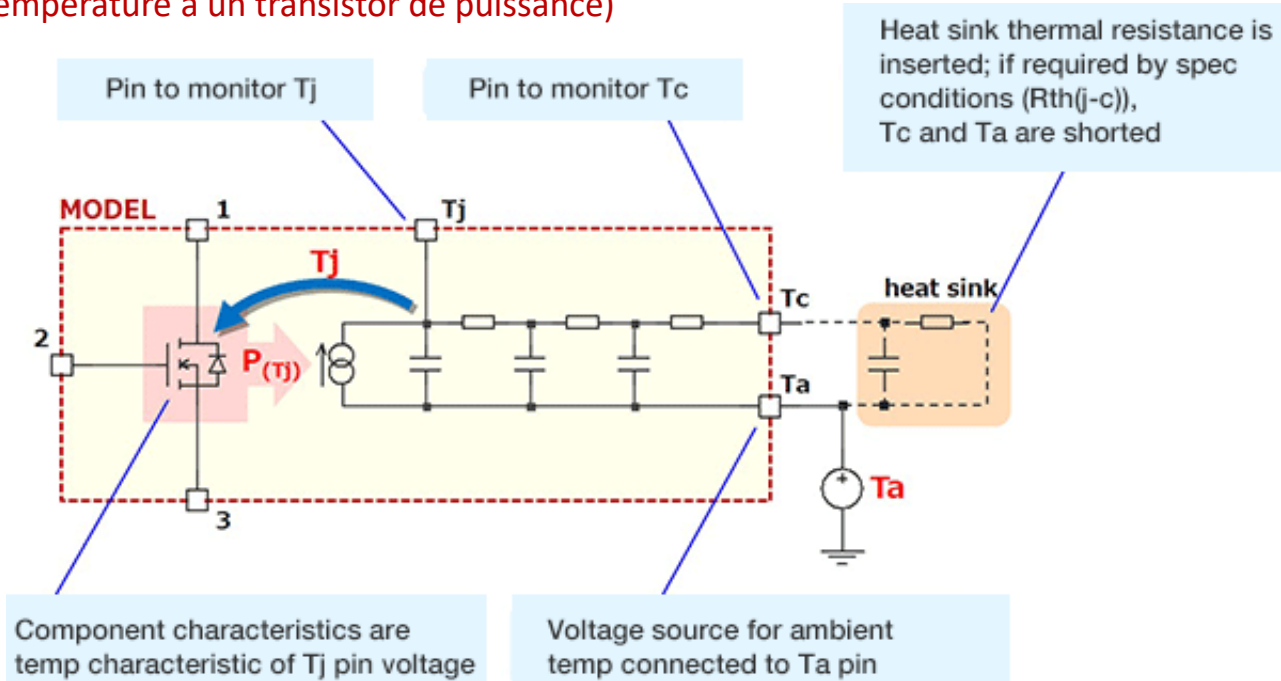
*Papotages audiophiles n°0*

# Impédance acoustique, initiation. 6/14

## Impédance thermique (température à un transistor de puissance)

$$R_{th} := \frac{T_j - T_a}{P_d}$$

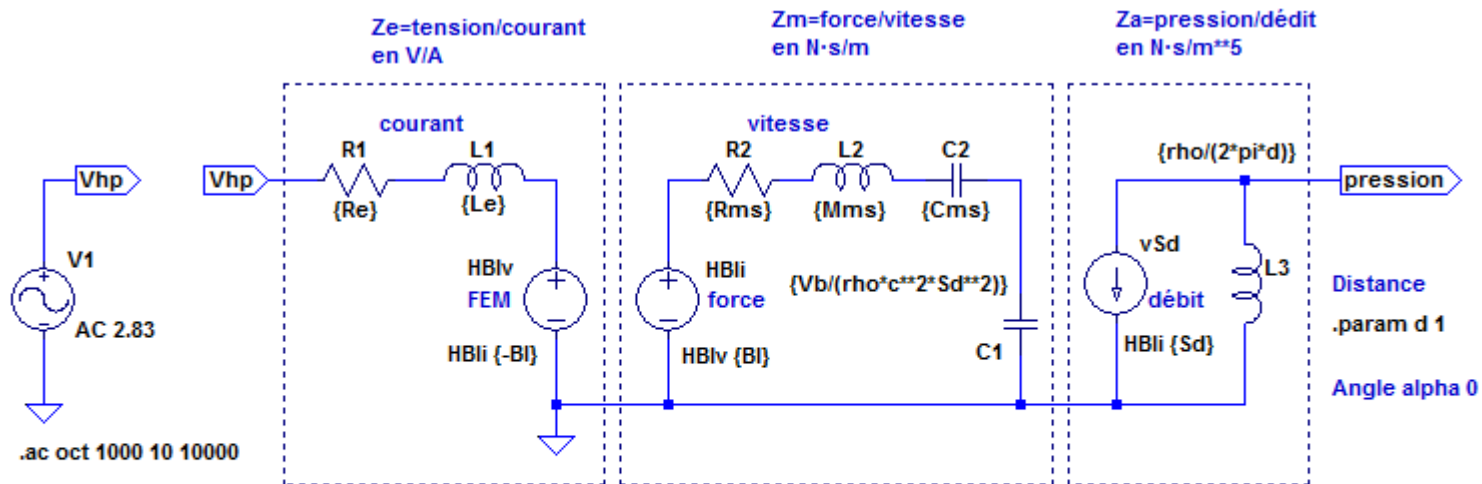
Thermal circuit		Electrical circuit
$P_d$ [W]	→	I [A]
$T_j$ [°C]	→	V [V]
$R_{th}$ [°C/W]	→	R [Ω]
Thermal capacity	→	C [F]



<https://techweb.rohm.com/knowledge/simulation/s-simulation/01-s-simulation/8390>

# Impédance acoustique, initiation. 7/14

A un haut-parleur à rayonnement direct (suivant la surface émissive)



## Paramètres du HP

.param Re 4.2  
 .param Le 1.8e-3  
 .param Rms 1.8  
 .param Mms 78e-3  
 .param Cms 0.74e-3  
 .param BI 10.7  
 .param Sd 31.2e-3

## Volume enceinte close

.param Vb 0.039

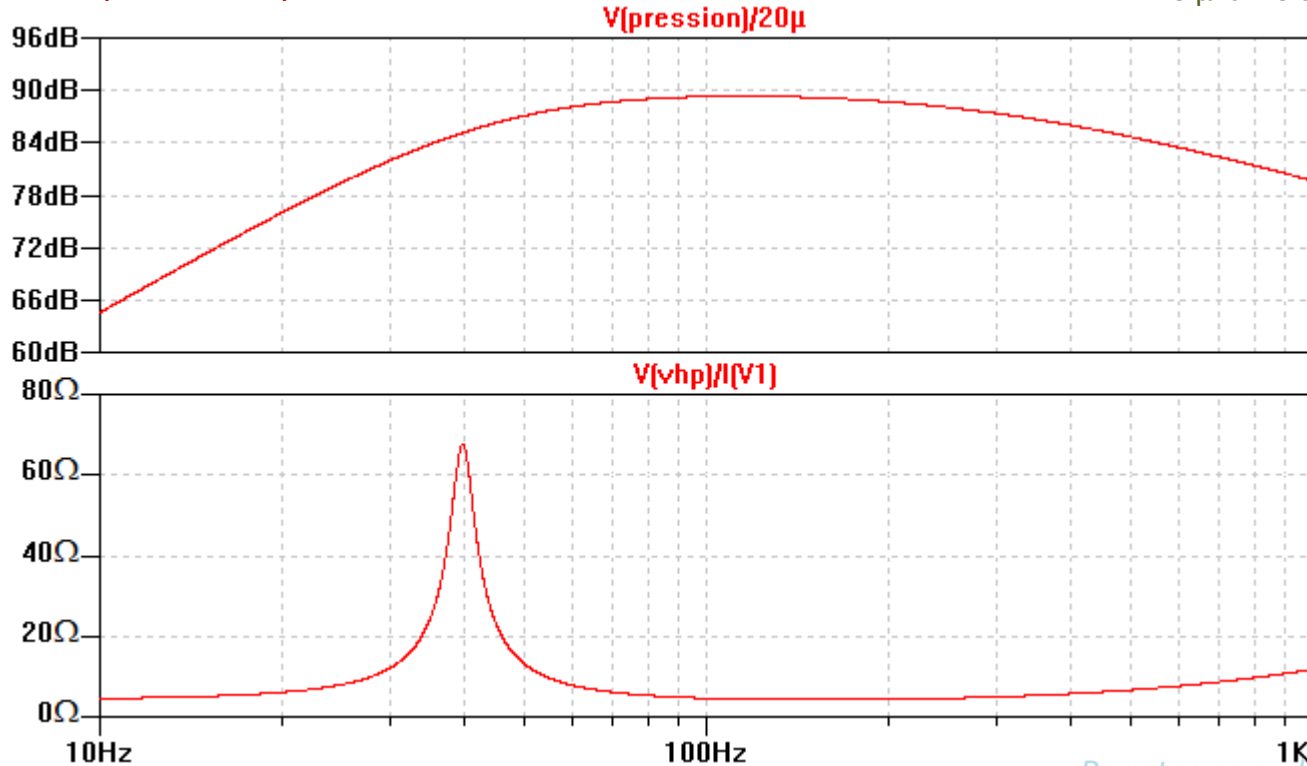
## Constantes

.param rho 1.18  
 .param c 344

# Impédance acoustique, initiation. 8/14

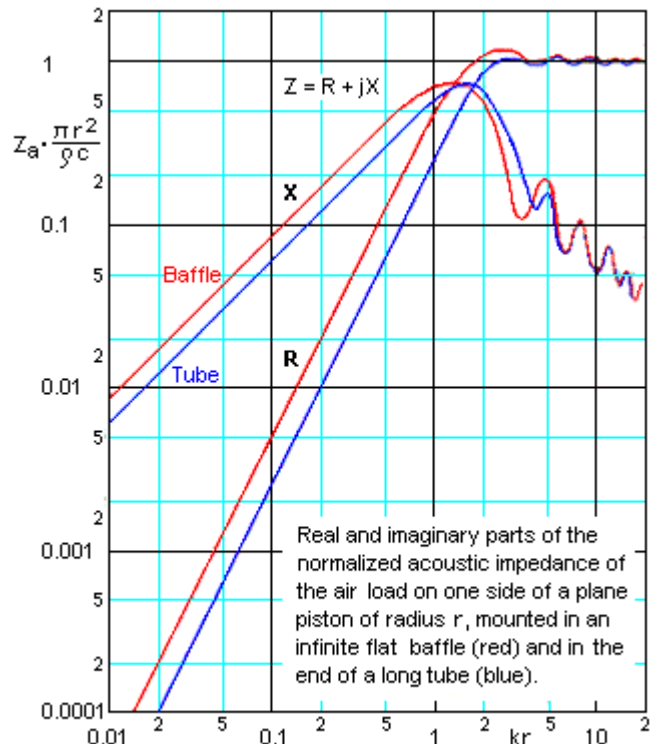
A un haut-parleur à rayonnement direct

20  $\mu\text{Pa}$  = 0 dB SPL



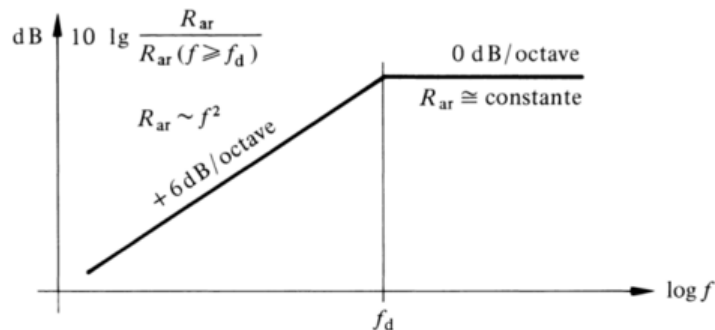
# Impédance acoustique, initiation. 9/14

## A un haut-parleur à rayonnement direct

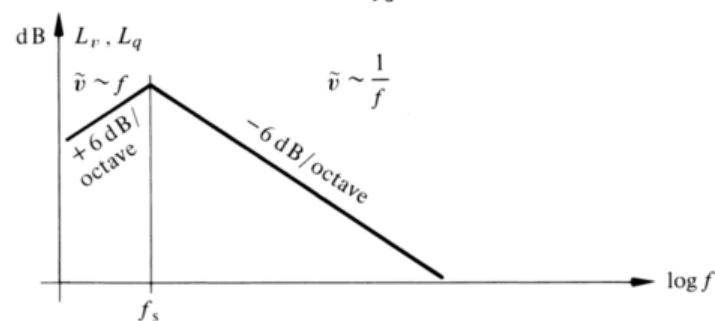


Frequency is plotted on a normalized scale, where  $kr = 2\pi r/c = 2\pi r/\lambda$ .  
After Beranek: Acoustics, McGraw-Hill 1954, pp 119, 122.

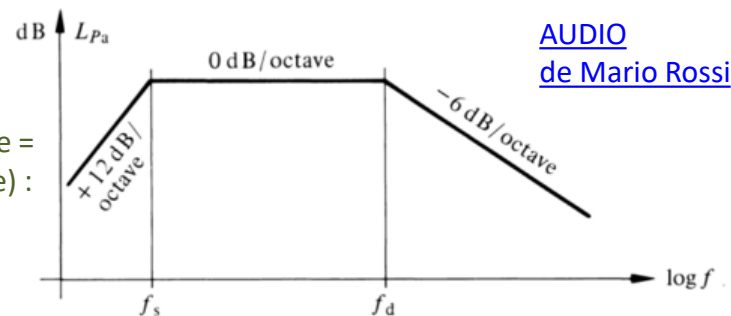
Résistance de rayonnement :



Vitesse au diaphragme :



Puissance acoustique = (Vitesse<sup>2</sup> · Résistance) :



[AUDIO de Mario Rossi](#)

Voir également : [Acoustical Engineering de Harry F. Olson](#)

## Impédance acoustique, initiation. 10/14

### A une enceinte multivoies (cohérence en rayonnement)

Spectre de 31Hz à 16kHz réparti sur 3 bandes de 3 octaves :

$$f_b := 31$$

$$k(f) := \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c}$$

$$f_h := 16000$$

$$f_{cw} := f_b \cdot \sqrt[3]{\frac{f_h}{f_b}}$$

$$f_{cw} = 249$$

$$f_{cm} := f_{cw} \cdot \sqrt[3]{\frac{f_h}{f_b}}$$

$$f_{cm} = 1.99 \cdot 10^3$$

$$S_{dh} := 7.5 \cdot 10^{-4}$$

$$a_h := \sqrt{\frac{S_{dh}}{\pi}}$$

$$R_{rh}(f) := \rho \cdot c \cdot \left( 1 - \frac{J_1(2 \cdot k(f) \cdot a_h)}{k(f) \cdot a_h} \right) \cdot \pi \cdot a_h^2$$

$$S_{dm} := S_{dh} \cdot \sqrt[3]{\frac{f_h}{f_b}}$$

$$S_{dm} = 6.02 \cdot 10^{-3}$$

$$a_m := \sqrt{\frac{S_{dm}}{\pi}}$$

$$R_{rm}(f) := \rho \cdot c \cdot \left( 1 - \frac{J_1(2 \cdot k(f) \cdot a_m)}{k(f) \cdot a_m} \right) \cdot \pi \cdot a_m^2$$

$$S_{dw} := S_{dm} \cdot \sqrt[3]{\frac{f_h}{f_b}}$$

$$S_{dw} = 0.0483$$

$$a_w := \sqrt{\frac{S_{dw}}{\pi}}$$

$$R_{rw}(f) := \rho \cdot c \cdot \left( 1 - \frac{J_1(2 \cdot k(f) \cdot a_w)}{k(f) \cdot a_w} \right) \cdot \pi \cdot a_w^2$$

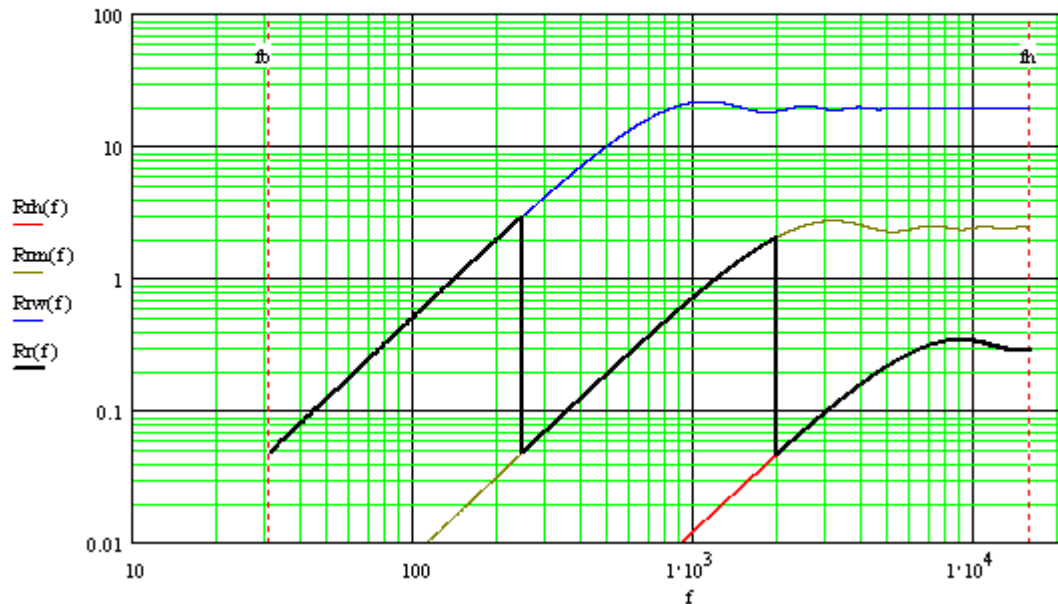
Ce qui donne, pour cohérence en partant d'un tweeter de 7,5cm<sup>2</sup> : 60cm<sup>2</sup> au médium et 480cm<sup>2</sup> au woofer.

# Impédance acoustique, initiation. 11/14

## A une enceinte multivoies (cohérence en rayonnement)

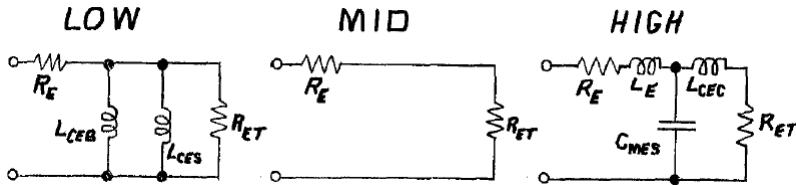
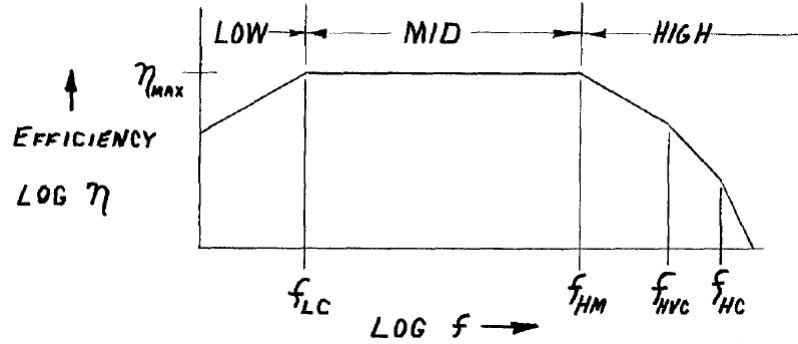
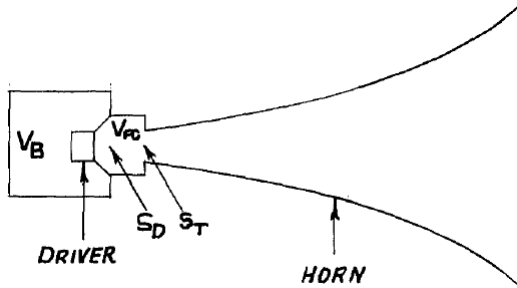
$$R_t(f) := \begin{cases} R_{rw}(f) & \text{if } f_b \leq f < f_{cw} \\ R_{rm}(f) & \text{if } f_{cw} \leq f < f_{cm} \\ R_{rh}(f) & \text{if } f_{cm} \leq f \leq f_h \end{cases}$$

Quand les impédances ne sont plus normalisées, mais pondérées suivant les surfaces émissives :

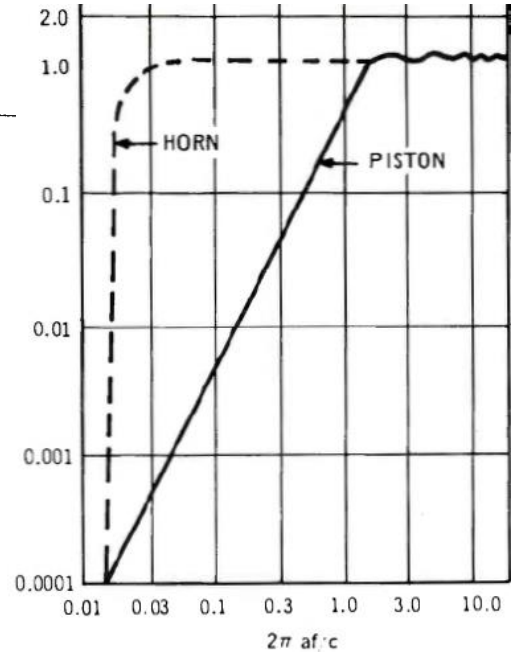


# Impédance acoustique, initiation. 12/14

A un haut-parleur à pavillon (adaptation d'impédance)



[http://www.xrtechs.com/db\\_keelee.com/...horn\\_aes.pdf](http://www.xrtechs.com/db_keelee.com/...horn_aes.pdf)



$$\eta = \frac{2 R_E R_{ET}}{(R_E + R_{ET})^2}$$

where  $R_{ET} = S_T B^2 l^2 / (\rho c S_D^2)$ ,

which is maximized when  $R_{ET} = R_E$

[http://www.kazojc.com/.../The\\_Why\\_and\\_How\\_of\\_Horn\\_Loudspeakers.pdf](http://www.kazojc.com/.../The_Why_and_How_of_Horn_Loudspeakers.pdf)

# Impédance acoustique, initiation. 13/14

## A l'isolation acoustique (transmission et réflexion)

Coefficient de transmission d'intensité à une interface :

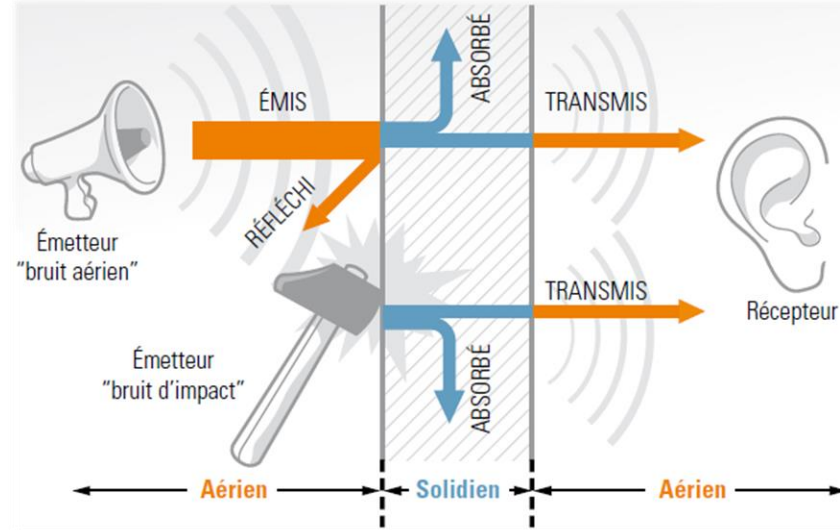
$$T := \frac{4 \cdot Z1 \cdot Z2}{(Z2 + Z1)^2}$$

Coefficient de réflexion d'intensité à une interface :

$$R := \frac{(Z2 - Z1)^2}{(Z2 + Z1)^2}$$

Si  $Z2 = Z1$  : pas de réflexion, notion d'adaptation d'impédance.

- Que penser quand : air pour  $Z1$  et béton pour  $Z2$  ?
- Pourquoi du gel à une échographie ?



Indice d'affaiblissement suivant la loi de masse (absorption par dissipation thermique) :

$$R_o := 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{Ms \cdot \omega}{2 \cdot \rho \cdot c} \right)$$

6dB d'affaiblissement quand :

- la masse surfacique  $Ms$  double
- la fréquence du bruit double

Attention,  $R_o$  décroît si la paroi entre en résonance.

# Impédance acoustique, initiation. 14/14

## Au traitement acoustique (réflexion diffuse et absorptions)

**Réflexion diffuse** : vs réflexion spéculaire (lumière; miroir, pomme)



<http://argen.com/wp-content/docs/Acoustic-Diffuser-Optimization-Argen.pdf>

**Absorptions** (par matériau poreux, par diaphragme, par résonateur\*) :

$$\alpha(\text{freq}) := \frac{W_{\text{transmise}} + W_{\text{dissipée}}}{W_{\text{incidente}}}$$

$$\alpha(\text{freq}) := \frac{W_{\text{absorbée}}}{W_{\text{incidente}}} \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

$$\alpha(\text{freq}) := 1 - \frac{W_{\text{réfléchi}}}{W_{\text{incidente}}}$$

**Aire d'absorption totale équivalente**, qui conditionne avec le volume de la pièce, le temps de réverbération :

$$A_{\text{tot}} := \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i$$

*Papotages audiophiles n°0*