

Enceintes électroacoustiques

Réponse du haut parleur pour différentes configurations

Bruno GAZENGEL

Objectif / Méthode

- Prédire la réponse acoustique d'un haut-parleur placé dans un environnement connu (enceinte close, enceinte à événement, ...)
- Méthode
 - Connaître les paramètres du haut-parleur (fiche technique ou mesure)
 - Connaître les caractéristiques de l'enceinte (volume, taille de l'événement)
 - Connaître les caractéristiques de rayonnement
 - Calcul de la vitesse de la membrane en fonction de la fréquence
 - Calcul du niveau sonore à une distance connue de l'enceinte

Principe de base

- Le haut-parleur est un résonateur à 1 degré de liberté contrôlé par 3 paramètres
 - La masse (de l'équipage mobile)
 - La raideur (de la suspension)
 - L'amortissement (transformation de l'énergie en chaleur dans la résistance électrique et dans les frottements)
- La réponse en vitesse est maximale à la fréquence de résonance. L'amplitude à la fréquence de résonance dépend du facteur de qualité (pertes)
- Cf. **Vidéo 1** et **vidéo 2**.

Principe de base

- Réponse en vitesse du haut-parleur
 - Ecriture générale
 - Pulsation de résonance ω_r
 - Facteur de qualité Q
 - Résistance R

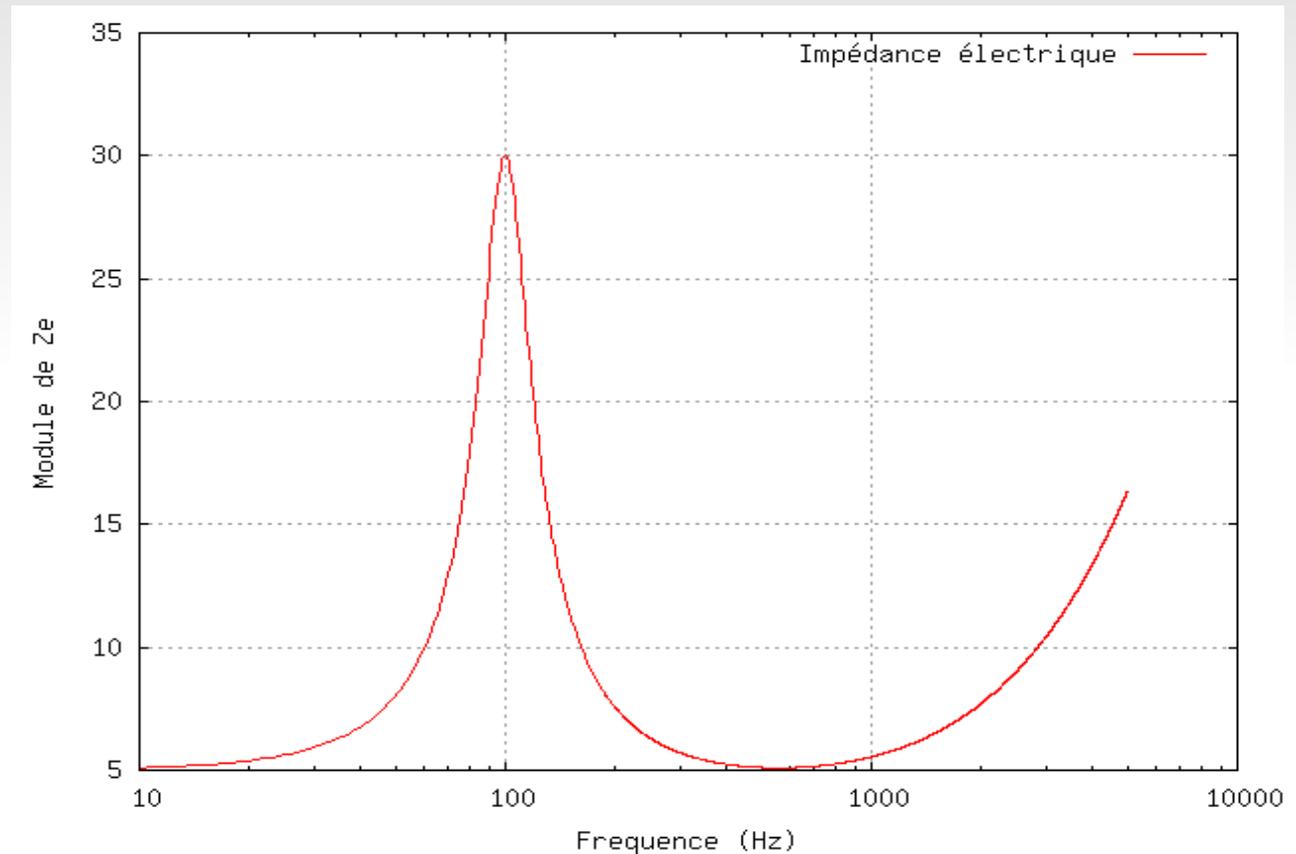
$$\frac{v}{U} = \frac{1}{R} \frac{j \frac{\omega}{\omega_r} Q}{1 + j \frac{\omega}{\omega_r} Q - \left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)^2}$$

Modèle du haut-parleur dans le vide

- Impédance électrique

$$U = Z_{eb} i + Bl v$$

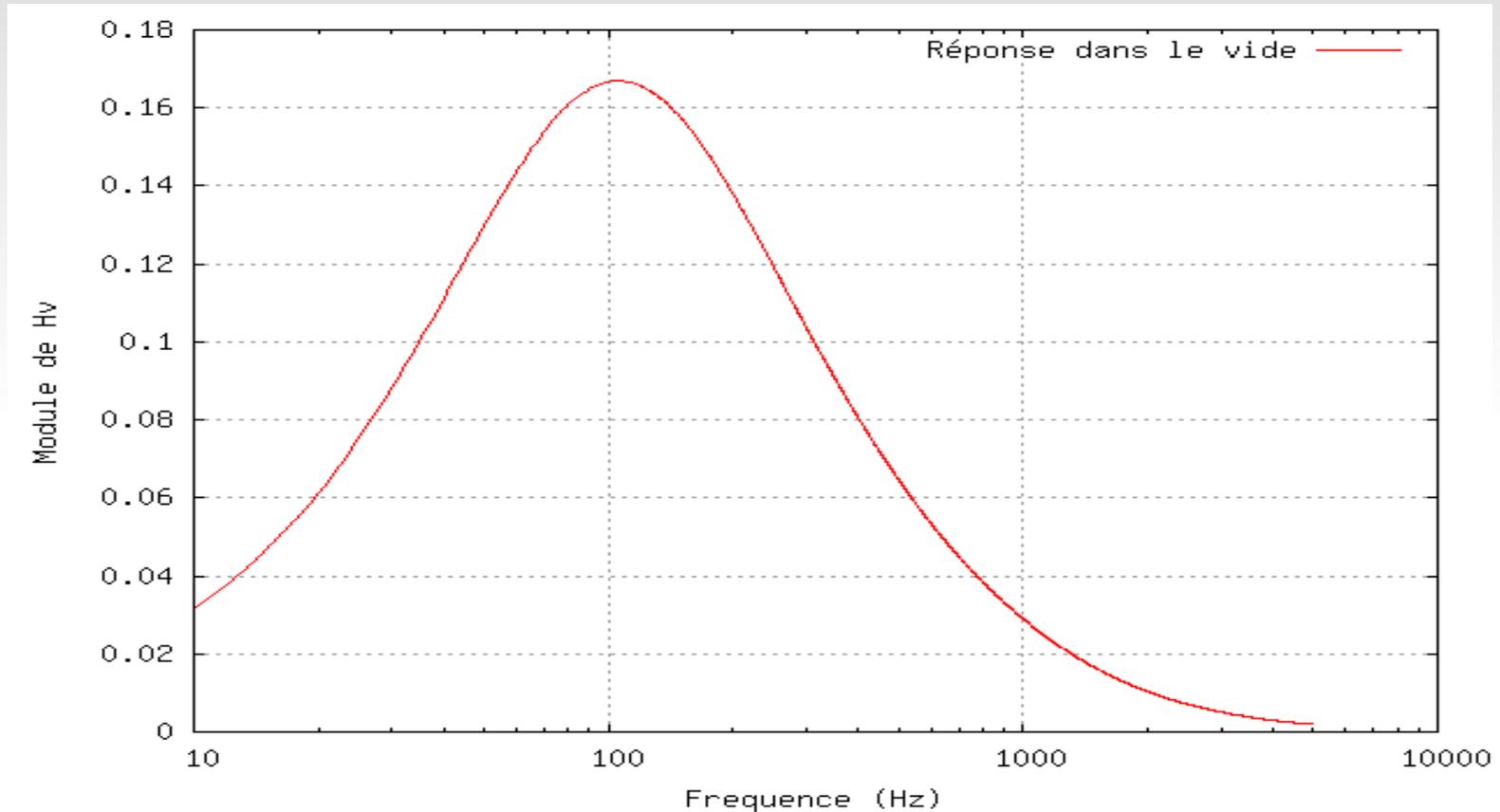
$$Bl i = Z_{md} v$$



$$Z_e = \frac{U}{i} = Z_{eb} + \frac{Bl v}{i} = R_{eb} + j \omega L_{eb} + \frac{(Bl)^2}{Z_{md}}$$

Modèle du haut-parleur dans le vide

- Réponse en vitesse

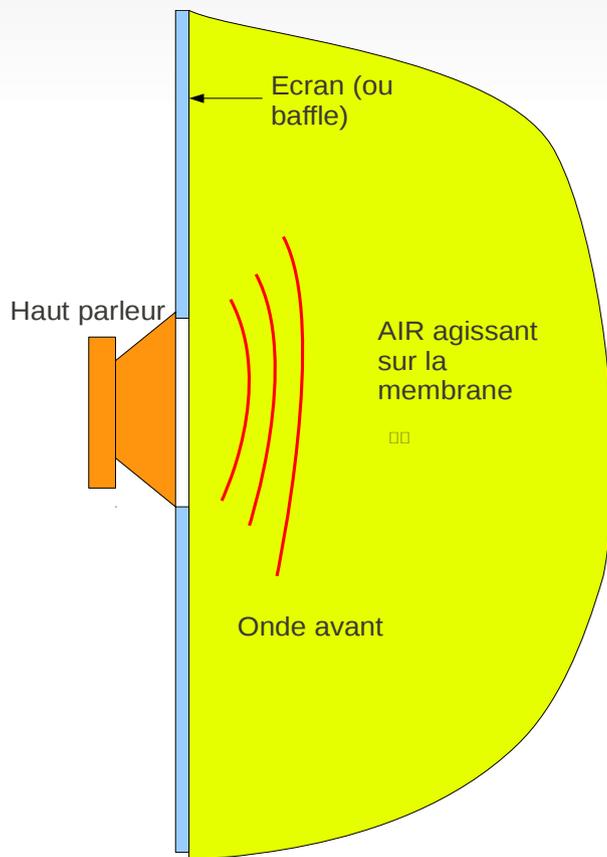


$$H_v = \frac{v}{U} = \frac{Bl Y_{eb}}{Z_{md} + (Bl)^2 Y_{eb}}$$

$$Y_{eb} = \frac{1}{Z_{eb}}$$

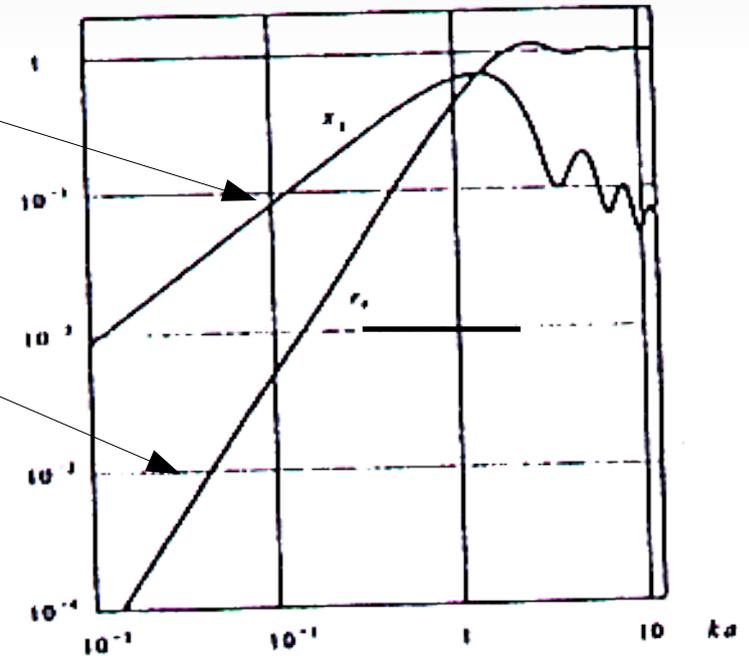
Modèle du haut-parleur dans l'air

- Charges acoustiques classiques
 - Impédance de rayonnement (sur écran infini) pour $k r_d < 1$
 - Traduit l'action mécanique de l'air sur la membrane du haut-parleur
 - Dans le cas d'un rayonnement en $\frac{1}{2}$ espace infini



$$M_{av} = \frac{8}{3\pi} \frac{\rho r_d}{S_d}$$

$$R_{av} = \frac{\rho c}{S_d} \frac{1}{4} \left(\frac{\omega r_d}{c} \right)^2$$



$$Z_{av} = R_{av} + j\omega M_{av}$$

Modèle du haut-parleur dans l'air

- Charges acoustiques classiques
 - Enceinte close volume V
 - Hypothèse $f \ll \frac{c}{\sqrt[3]{V}}$ $\lambda \ll \text{Distance maximale}$
 - Impédance de charge
 - L'enceinte acoustique est vue comme une souplesse acoustique (équivalent à un ressort)

$$Z_{aec} = \frac{1}{j\omega C_{aec}} \quad C_{aec} = \frac{V}{\rho c^2}$$

Modèle du haut-parleur dans l'air

- Couplage mécano-acoustique

$$F_{av} = S_d P_{av} \quad F_{ar} = S_d P_{ar} \quad D = S_d v$$

- Charges acoustiques

$$P_{av} = Z_{av} D \quad P_{ar} = -Z_{ar} D \quad F_{av} - F_{ar} = S_d^2 (Z_{av} + Z_{ar}) \cdot v$$

- Equipage mobile

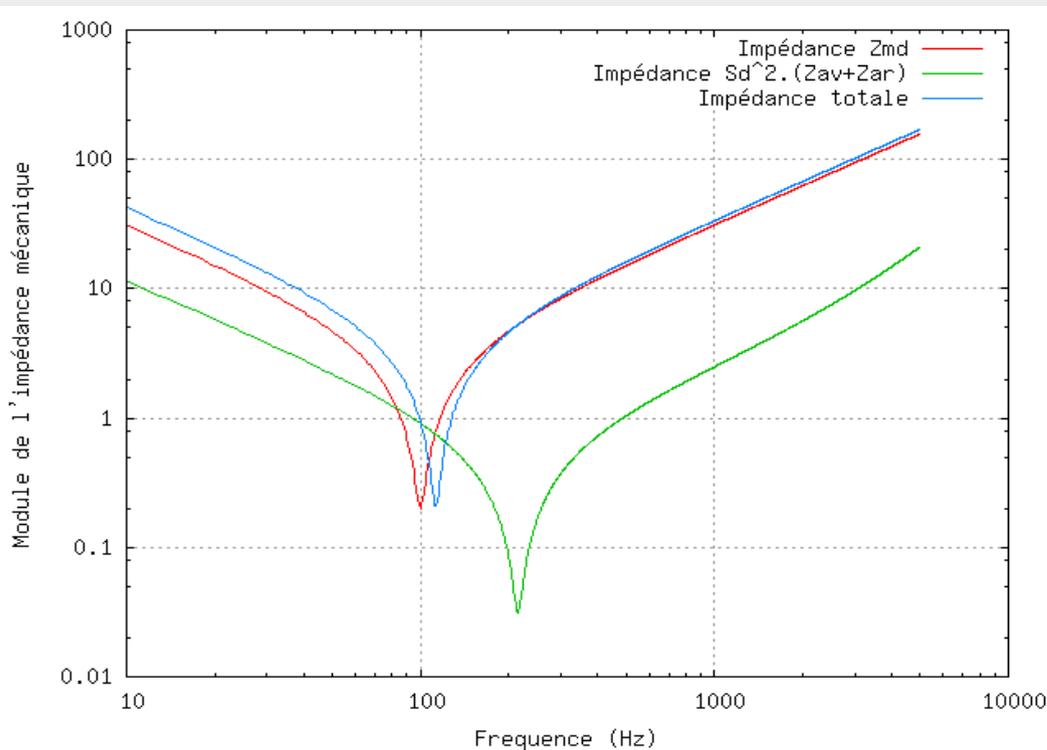
$$F_{em} = Z_{md} v + F_{av} - F_{ar} = \left(Z_{md} + S_d^2 (Z_{av} + Z_{ar}) \right) v \quad Z_{mad} = Z_{md} + S_d^2 (Z_{av} + Z_{ar})$$

- Impédance électrique/Réponse en vitesse

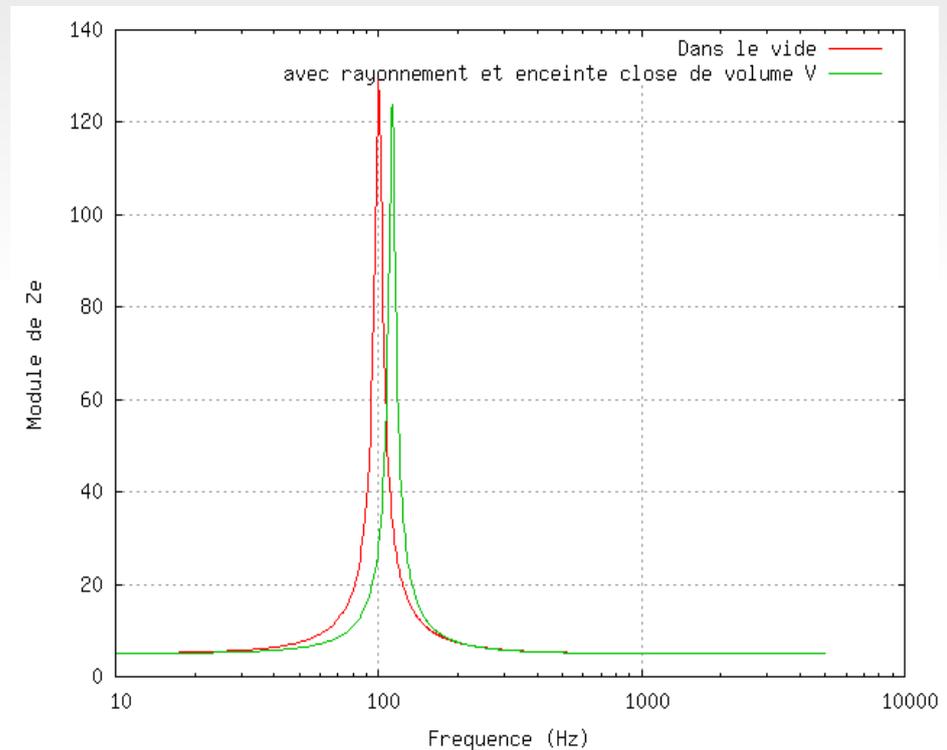
$$Z_e = \frac{U}{i} = Z_{eb} + \frac{Blv}{i} = R_{eb} + j\omega L_{eb} + \frac{(Bl)^2}{Z_{mad}} \quad H_v = \frac{v}{U} = \frac{Bl Y_{eb}}{Z_{mad} + (Bl)^2 Y_{eb}}$$

Modèle du haut-parleur dans l'air

- Réponse HP en enceinte close
 - Impédance mécanique

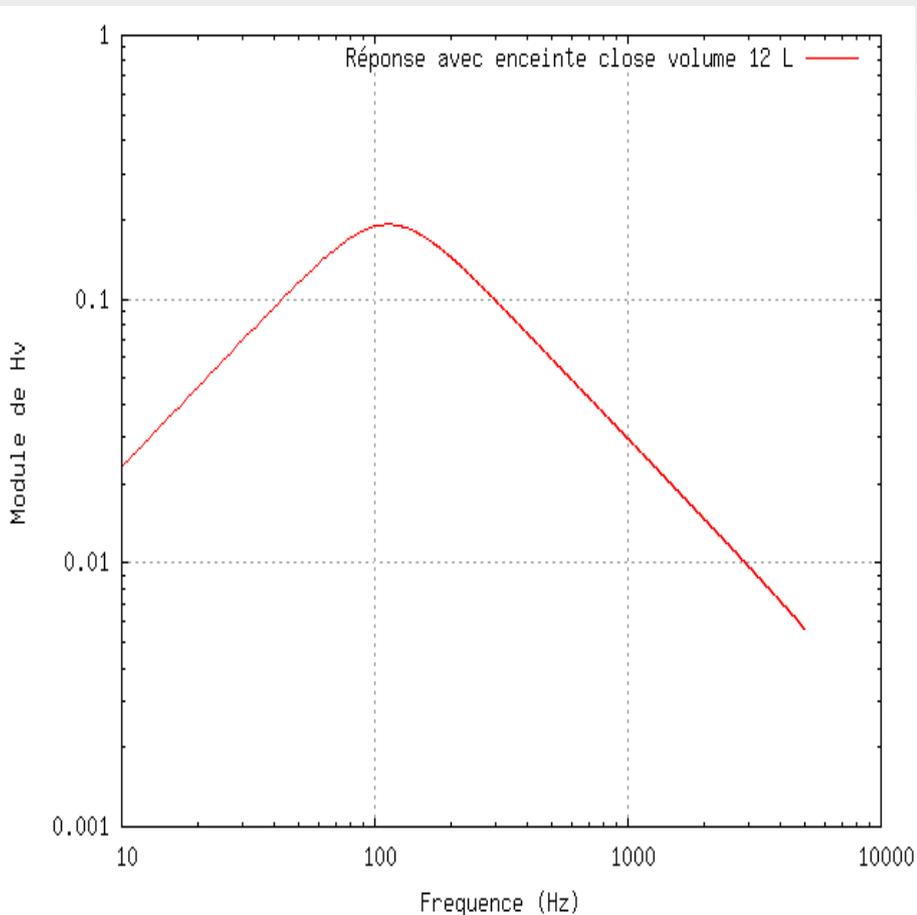


- Impédance électrique

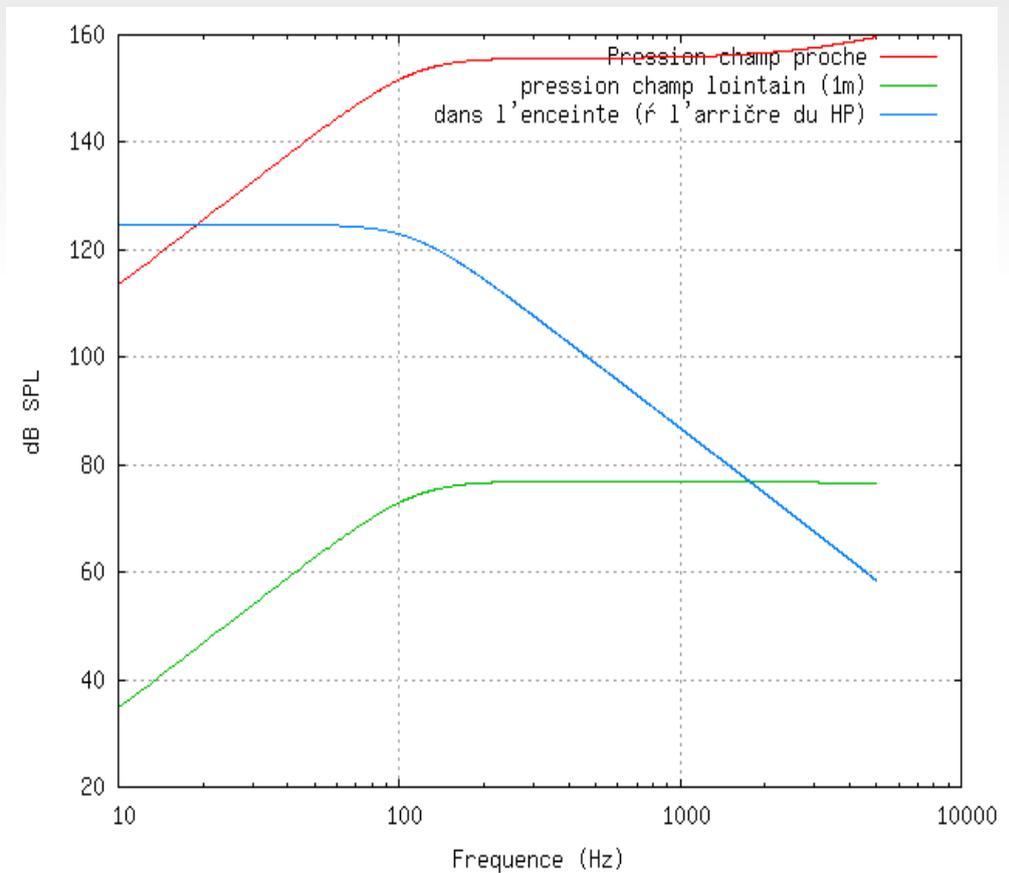


Modèle du haut-parleur dans l'air

- Réponse HP en enceinte close
 - Réponse en vitesse



- Réponse en pression



Modèle du haut-parleur dans l'air

- Effet de l'enceinte close sur la réponse en pression du haut-parleur

- Paramètre pertinent V_{as}/V_c

- V_{as} : volume d'air équivalent à la souplesse de la suspension

- V_c : volume de l'enceinte close

- Effet de l'enceinte sur

- La fréquence de résonance de l'enceinte

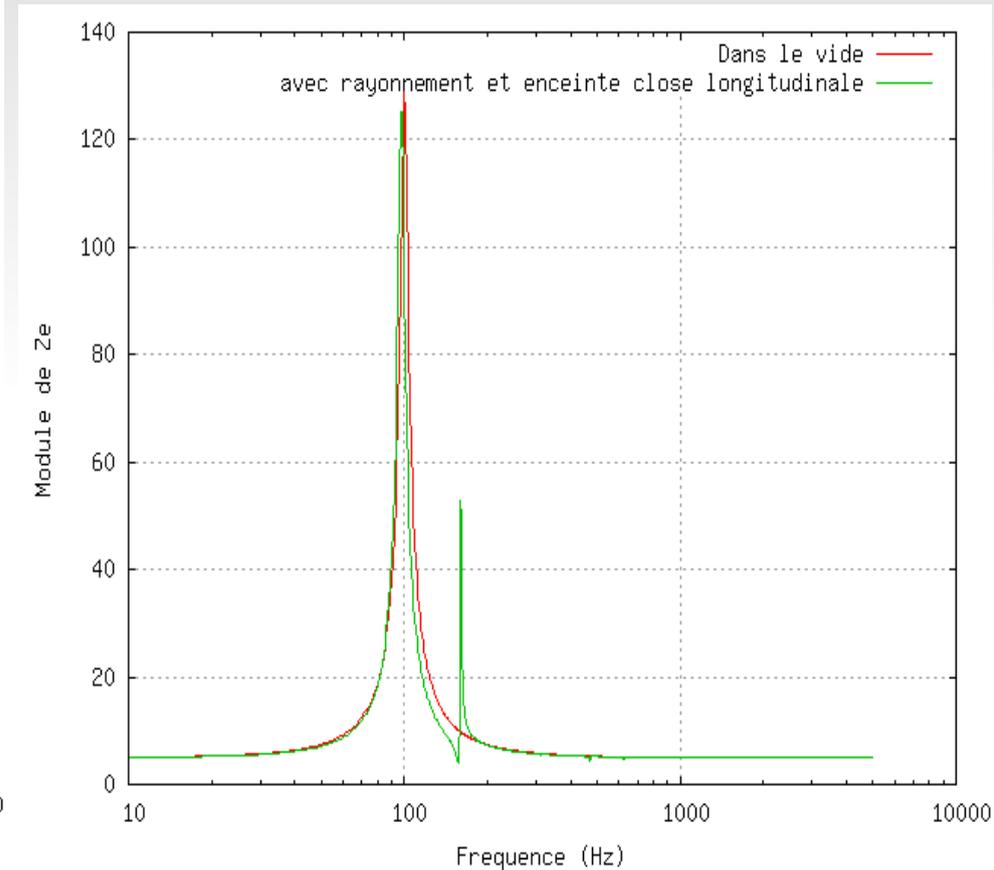
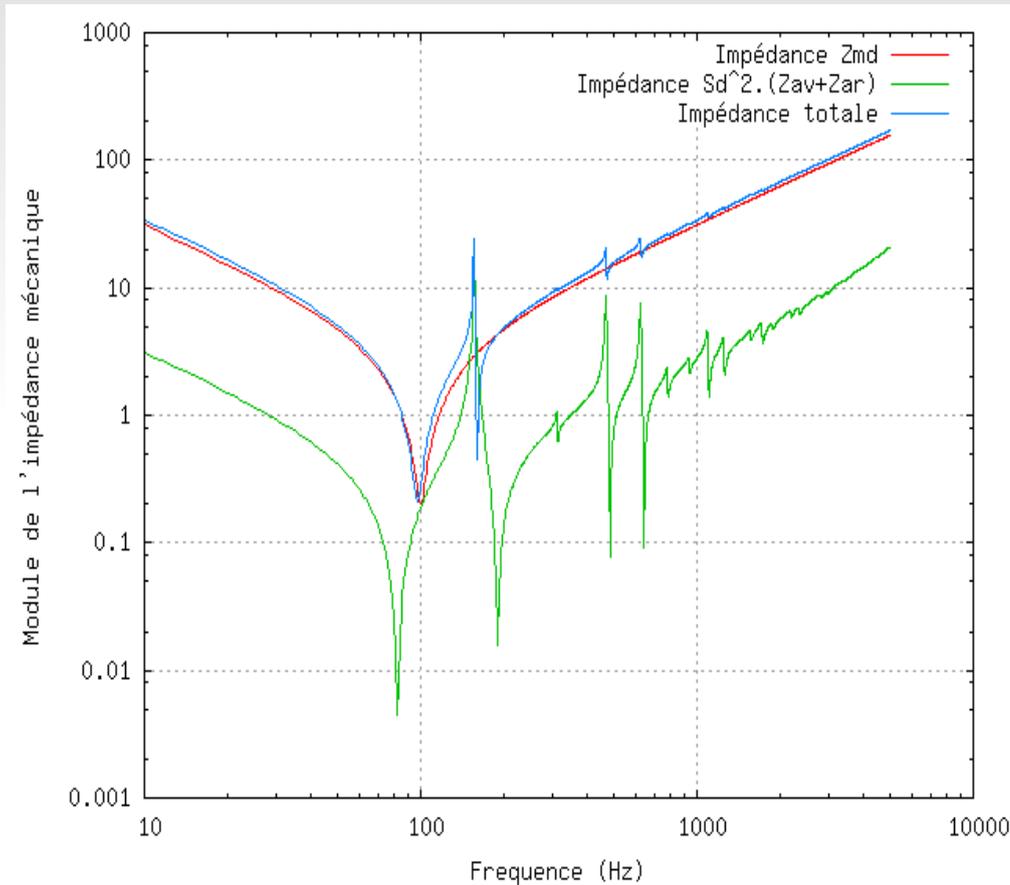
$$f_c = f_s \sqrt{1 + \frac{V_{as}}{V_c}}$$

- Le facteur de qualité de l'enceinte

$$Q_{tc} = Q_{ts} \sqrt{1 + \frac{V_{as}}{V_c}}$$

Modèle du haut-parleur dans l'air

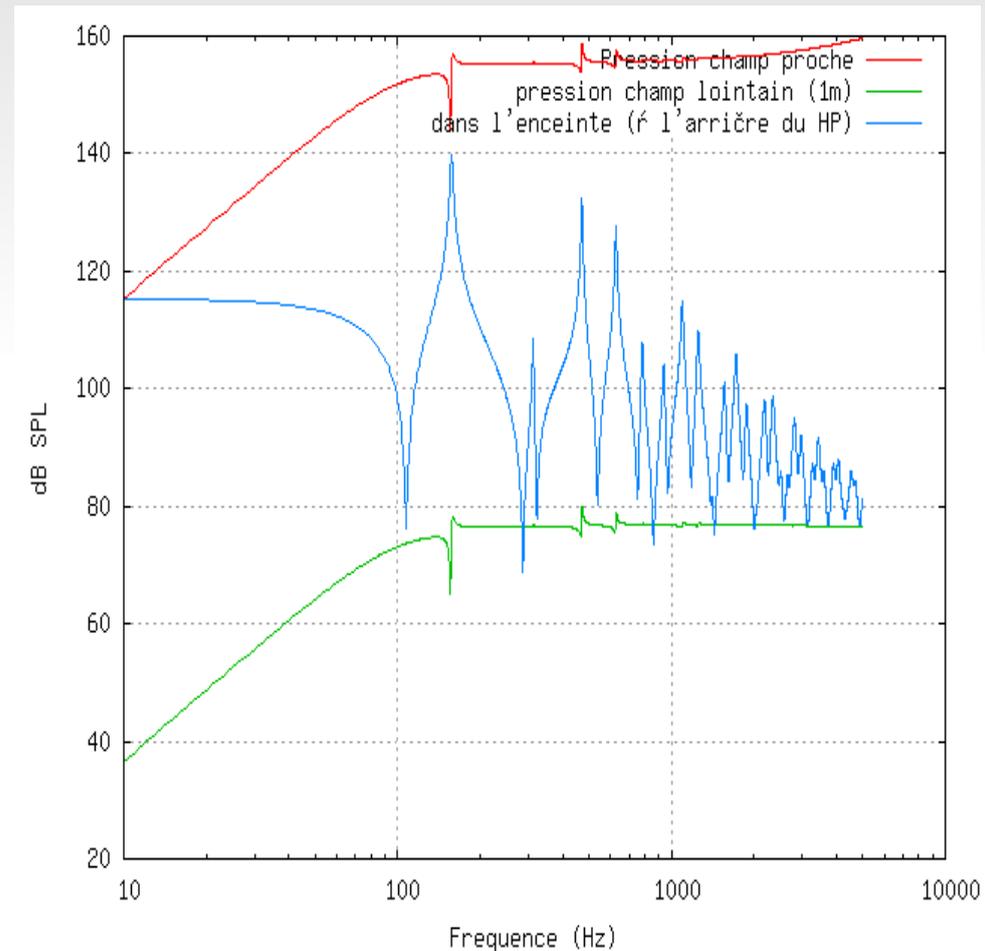
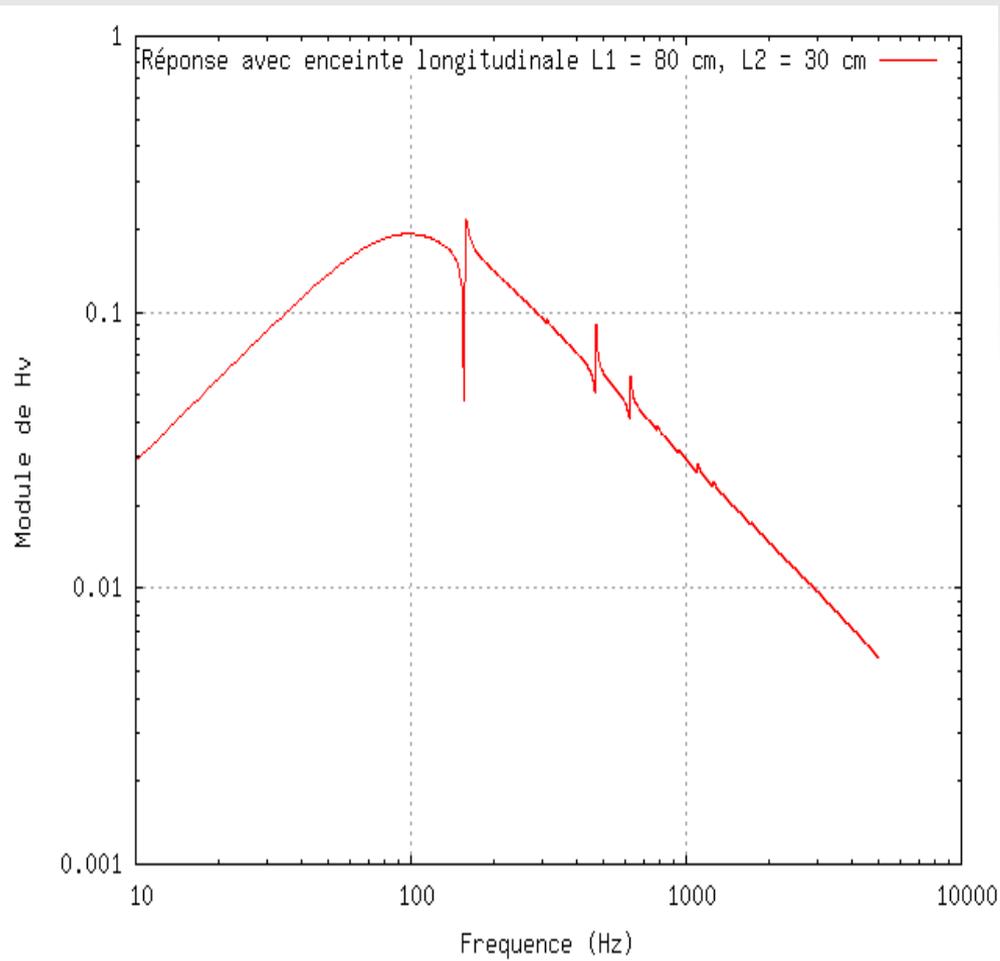
- Réponse HP en enceinte close longitudinale
 - Impédance mécanique
 - Impédance électrique



L'effet des résonances acoustiques de cavité est clairement visible

Modèle du haut-parleur dans l'air

- Réponse HP en enceinte close longitudinale
 - Réponse en vitesse
 - Réponse en pression



Conception d'une enceinte close

- Choisir le coefficient de qualité Q_{tc} souhaité. Une valeur de 0,707 donne une réponse assez plate et une réponse impulsionnelle qui ne traîne pas (cf. figures page suivante)

- Calculer le volume d'enceinte nécessaire connaissant le Q_{ts} et le V_{as} du haut-parleur

$$V_c = \frac{V_{as}}{\left(\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1}$$

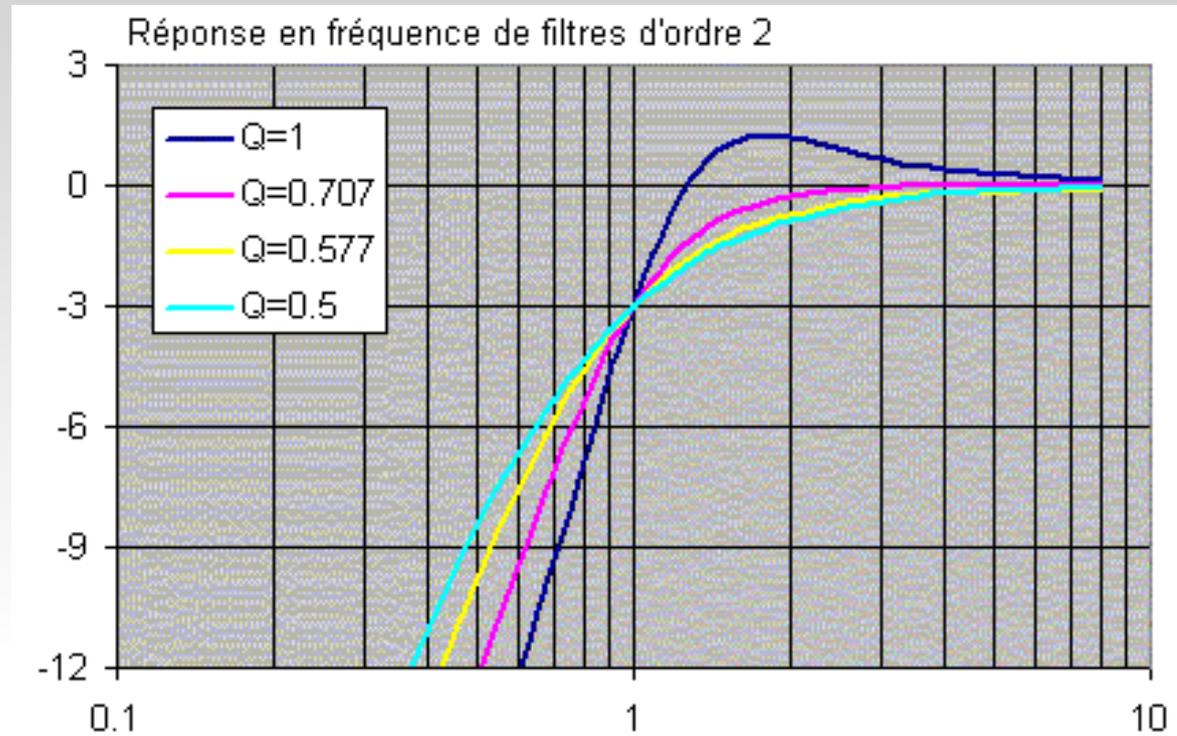
- En déduire la fréquence de résonance de l'enceinte

$$f_c = 0.76 f_s \sqrt{1 + \frac{V_{as}}{V_c}}$$

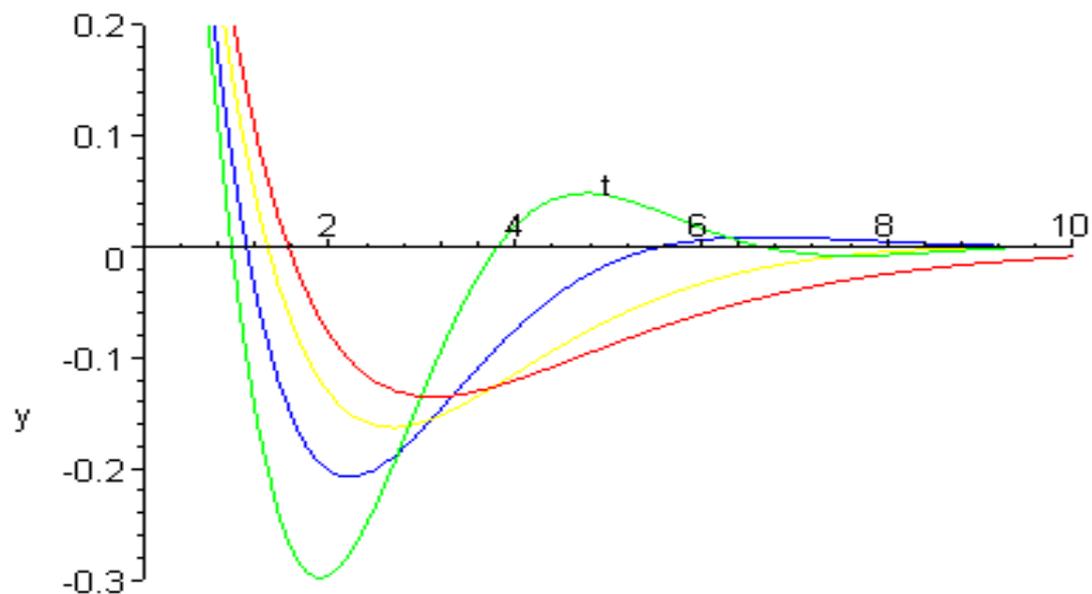
(vrai pour $Q_{tc} = 1,1$)

Conception d'une enceinte close

Réponse
fréquentielle



Réponse temporelle à
un échelon
en vert Q=1
en bleu Q=0,707
en jaune Q=0,577
en rouge Q=0,5



Conception d'une enceinte close

- Dispositions constructives
 - Eviter les résonances acoustiques dans l'enceinte
 - => La garnir de matériau poreux. Attention ceci augmente le volume équivalent de l'enceinte de 20 % environ. A prendre en compte dans le dimensionnement de l'enceinte suite au calcul de V_c
 - Eviter les résonances mécaniques de la boîte
 - Disposer des raidisseurs
 - Alourdir les parois avec du sable contenu entre deux « sous parois »
 - [Article sur le sujet](#)

Modèle du haut-parleur dans l'air

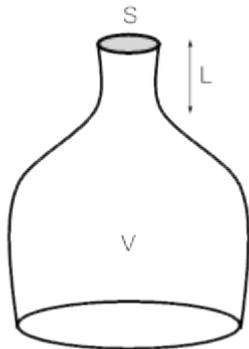
- Charges acoustiques classiques

- Enceinte à évent

- Hypothèse $f \ll \frac{c}{\sqrt[3]{V}}$ $\lambda \ll \text{Distance maximale}$

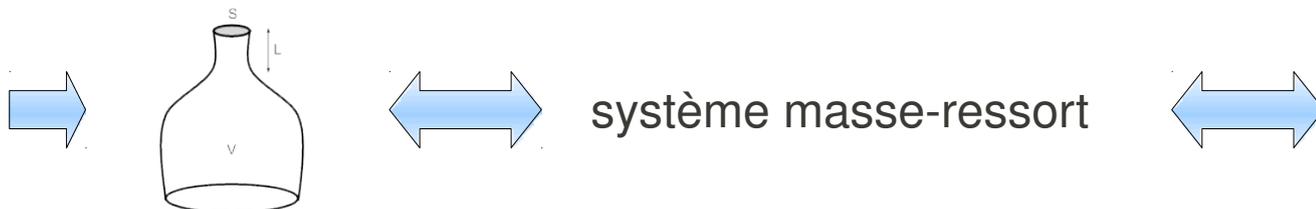
- Impédance de charge

- L'enceinte acoustique est vue comme un système résonant à un degré de liberté acoustique (Résonateur de Helmholtz)



air dans le goulot ~ « masse » de gaz qui se déplace sans se comprimer

air dans la bouteille ~ « ressort » gazeux

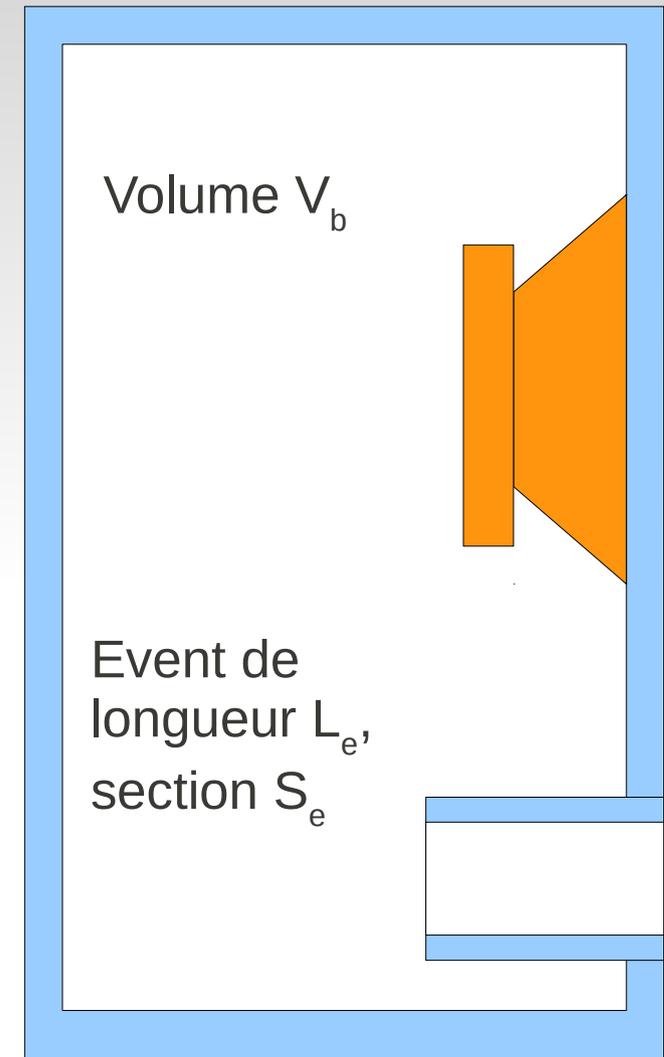


Modèle du haut-parleur dans l'air

- Charges acoustiques classiques
 - Enceinte à évent
 - Paramètres de l'enceinte : volume, évent
 - Impédance de charge
 - L'impédance acoustique vue par le haut-parleur s'écrit

$$Z_{ab} = j\omega \frac{M_{ae}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_b}\right)^2} \quad \omega_b = \frac{1}{\sqrt{M_{ae} C_{ab}}}$$

$$M_{ae} = \rho \frac{L_e}{S_e} \quad C_{ab} = \frac{V_b}{\rho c^2}$$



Fréquence de résonance de l'enceinte $f_b = \frac{\omega_b}{2\pi}$

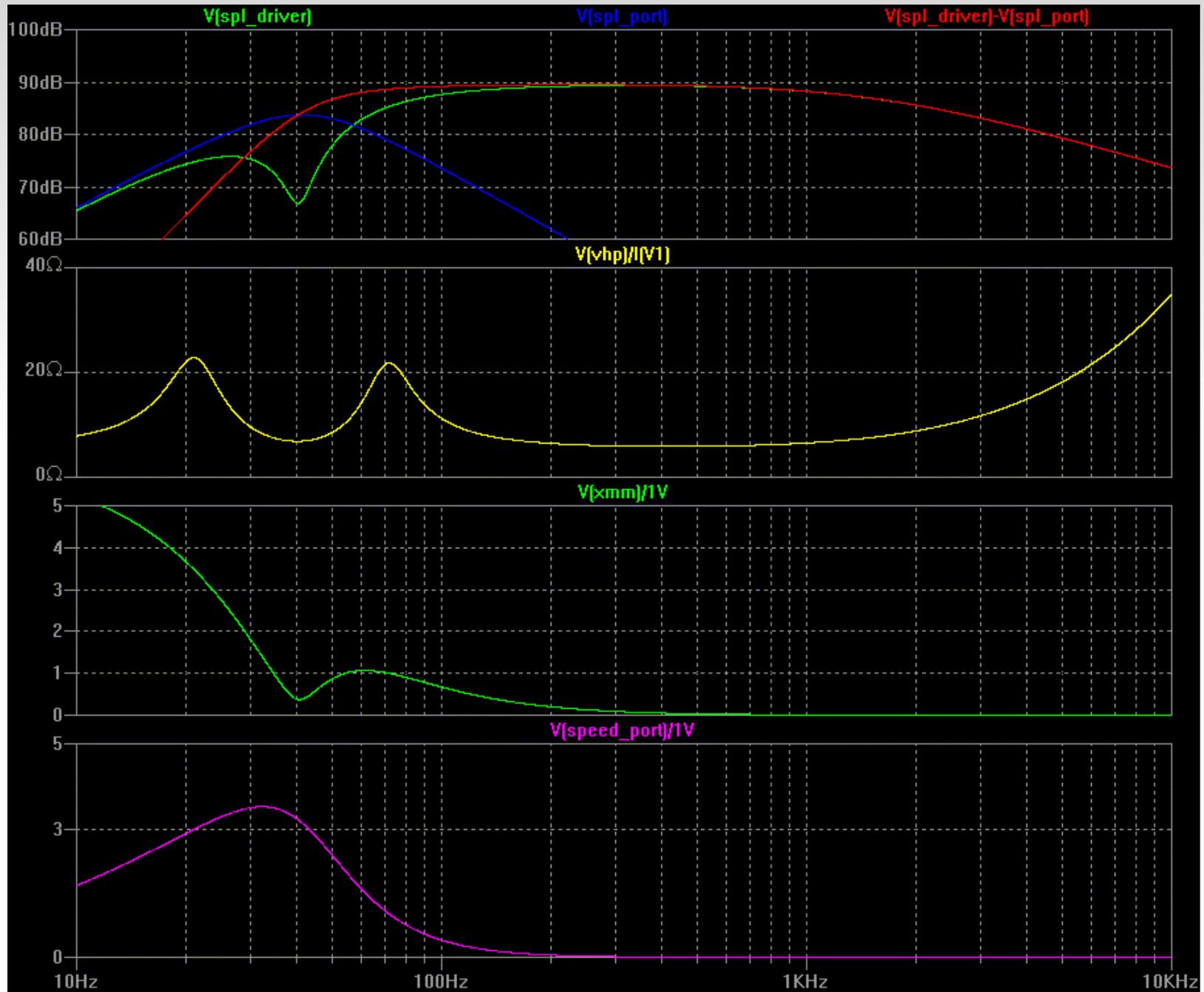
Conception d'une enceinte à événement

- Principe
 - Réponse : filtre d'ordre 4
 - Alignement sur des filtres d'ordre 4 connus (Butterworth, ...)
- Paramètres importants
 - Facteur de qualité total Q_{ts} du haut-parleur (doit être compris entre 0,18 et 0,56)
 - Volume d'air équivalent V_{as}
 - Fréquence de résonance f_s

Modèle du haut-parleur dans l'air

- Enceinte à évent

Niveau sonore
(vert : HP, bleu :
événement)



Impédance
électrique

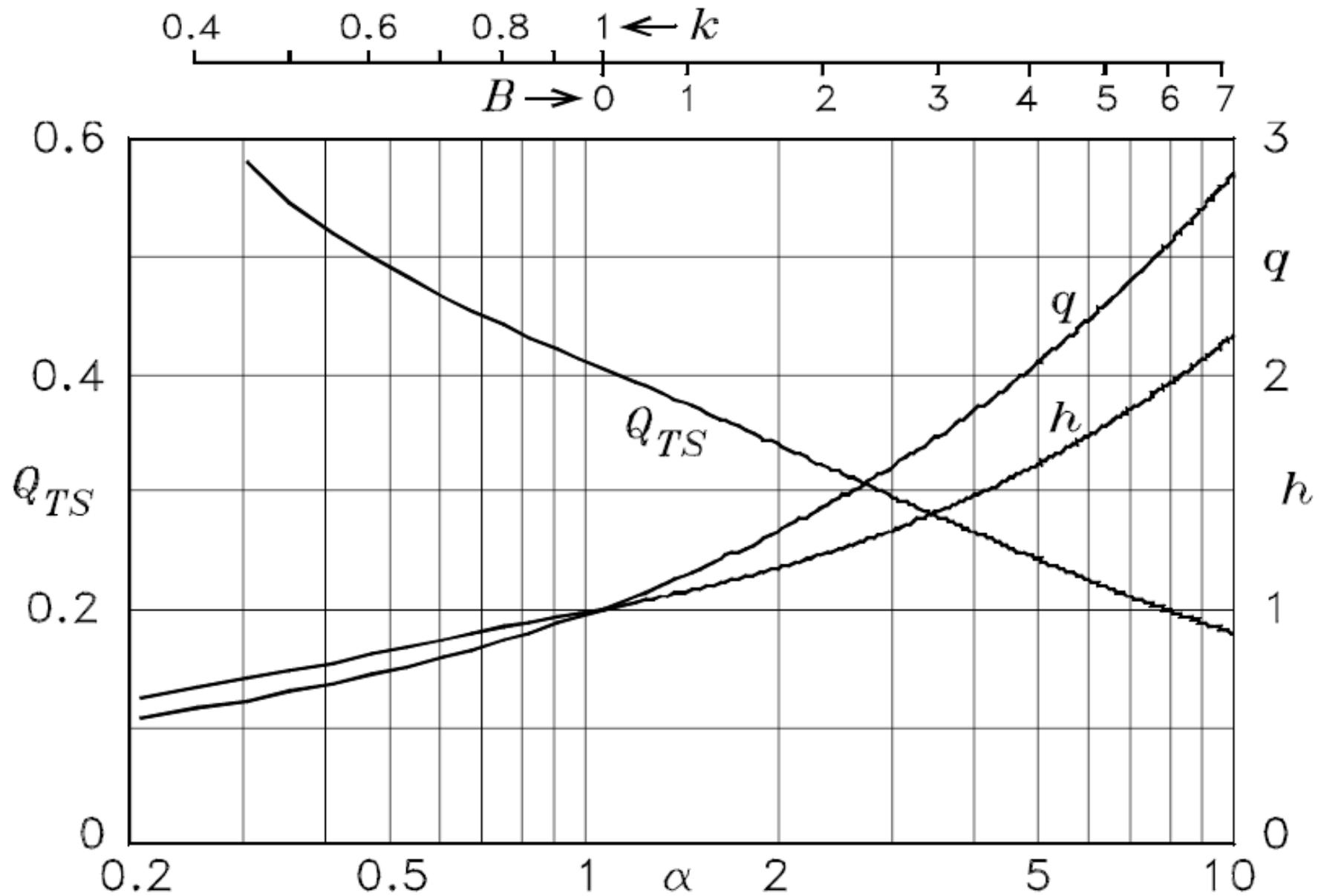
Déplacement
de la
membrane

Vitesse
acoustique
dans l'évent

Conception d'une enceinte à évent

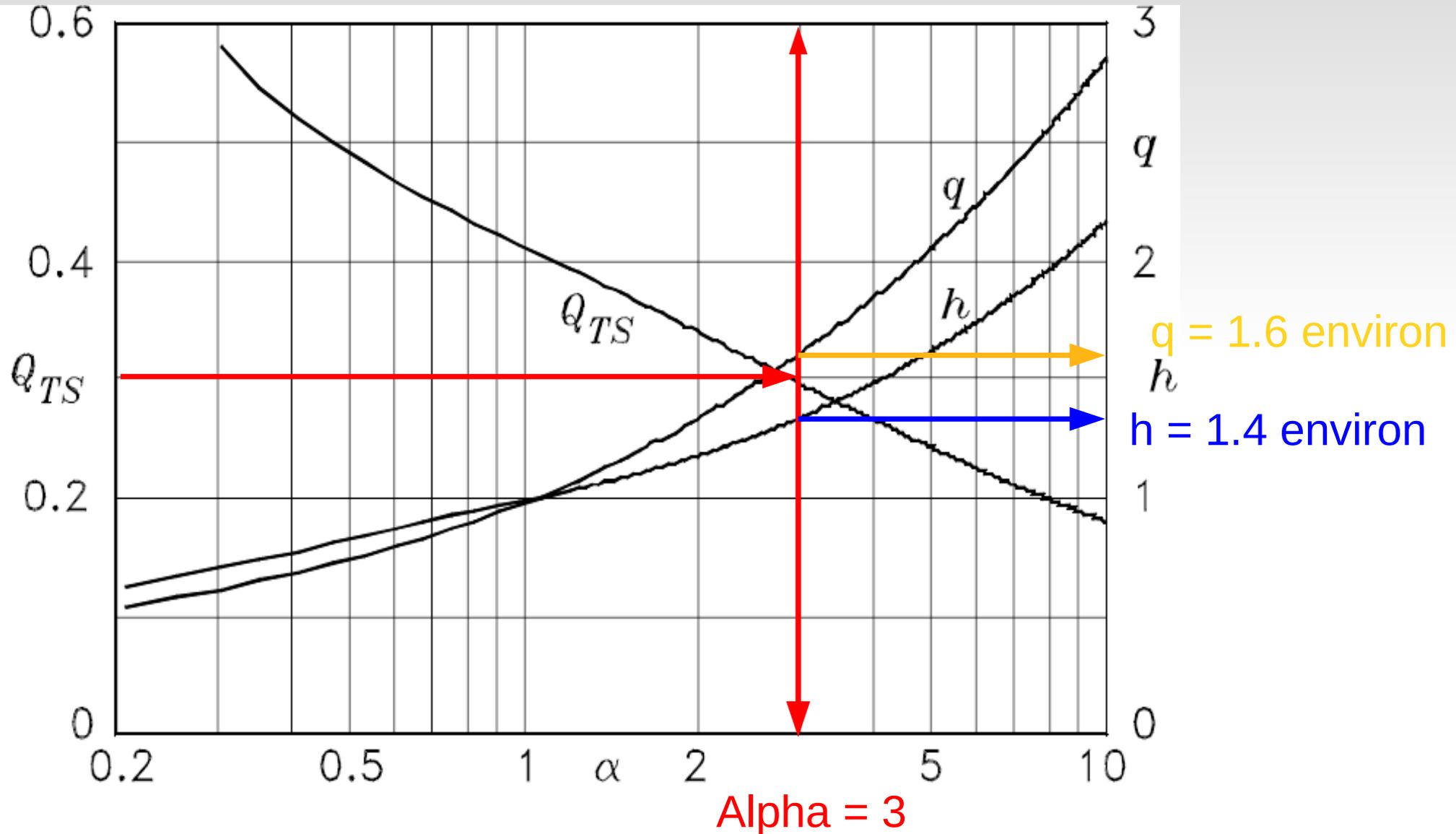
- Hypothèse : le coefficient de qualité du résonateur de Helmholtz est supposé égal à 7.
- Méthode proposée (cf graphe page suivante)
 - Partir du Q_{ts} du HP sur l'axe de gauche. Rejoindre la courbe Q_{ts} par une ligne horizontale.
 - En déduire la valeur de α et calculer le volume de l'enceinte $V_b = \frac{V_{as}}{\alpha}$
 - En déduire la valeur de $h = f_b/f_s$. Calculer la fréquence de résonance de l'enceinte $f_b = h \cdot f_s$
 - En déduire la valeur de q . Calculer la fréquence de coupure à -3 dB $f_{-3} = q f_s$

Conception d'une enceinte à évent



Conception d'une enceinte à évent

- Exemple : haut parleur de $Q_{ts} = 0,3$



Conception d'une enceinte à événement

- Dimensionnement de l'événement
 - Section de l'événement S_e : doit être suffisamment grand pour éviter les bruits de bouche. Dépend du volume maximal déplacé par le haut-parleur $V_d = S_d X_{max}$
 - Règle $S_e > 0,8 f_b V_d$
 - Longueur de l'événement
 - Calcul issu de la fréquence de résonance du résonateur de Helmholtz

$$L_e \approx \left(\frac{c}{2\pi f_b} \right)^2 \frac{S_e}{V_b} - 1,5 \sqrt{\frac{S_e}{\pi}}$$