

4.2 Charges acoustiques élémentaires des haut-parleurs

H. Lissek

28 novembre 2024

Objectif

L'objectif de ce cours est de présenter les charges acoustiques usuelles existant dans le cas des enceintes acoustiques fonctionnant aux basses fréquences.

Nous verrons également les propriétés de rayonnement de la membrane d'un haut-parleur.

Pré-requis

- Systèmes électriques, mécaniques et acoustiques
- Couplages électromécanique et mécanoacoustique

Qu'est ce qu'une charge acoustique ?

La vibration d'une membrane est influencée par la présence du fluide au contact de ses faces.

Pour un mouvement lent, le fluide est entraîné par la membrane et se déplace avec elle, sauf si des parois proches s'opposent à ce mouvement. Si la vibration est très rapide, l'inertie du fluide l'empêche de suivre parfaitement le mouvement de la membrane, et il subit aussi une compression.

Le terme de "charge acoustique" fait allusion à la réaction exercée par le fluide sur la membrane, dont le comportement est ainsi modifié.

Les charges acoustiques étudiées dans la suite de ce cours sont :

- le rayonnement acoustique (par une face sur un écran),
- l'enceinte close (volume étanche où le fluide est comprimé),
- l'enceinte à évent (résonateur de Helmholtz).

Rayonnement acoustique

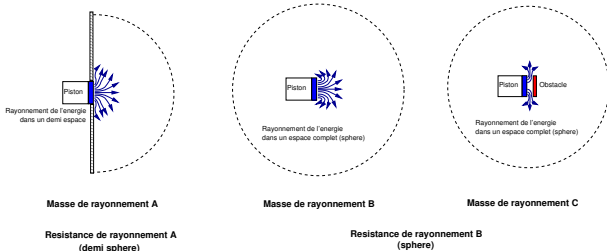
La charge acoustique la plus "utile" d'un haut-parleur est son rayonnement, c'est à dire le couplage entre sa membrane et l'air ambiant, symbolisé par l'impédance Z_{ar} présentée par le fluide à la membrane. Ce couplage conduit à deux phénomènes :

- A grande distance (on parle de "champ lointain"), la pression résulte de la propagation acoustique entre le haut-parleur et le point de mesure. Cette propagation n'a lieu que si un travail est fourni par la membrane au fluide, donc si celui-ci est comprimé à l'instant ou la membrane se déplace : la réaction du fluide doit alors être en phase avec la vibration de la membrane, ce qui correspond à la partie réelle de Z_{ar} .
- A très courte distance (on parle de "champ proche"), le mouvement du fluide suit celui de la membrane. La force d'inertie domine alors largement, et la réaction sur le fluide correspond essentiellement à la masse du fluide ainsi entraîné, appelée "masse de rayonnement". Ceci correspond à la partie imaginaire de Z_{ar} .

Rayonnement acoustique

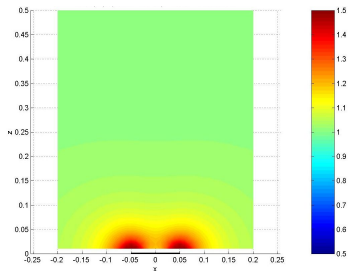
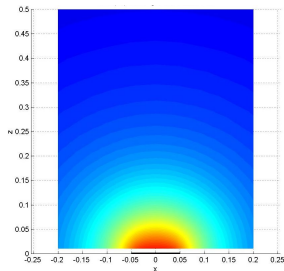
La figure ci-dessous illustre trois cas :

- Cas A : la masse de rayonnement est déterminée par l'existence d'un écran dans la continuité du piston oscillant. La résistance de rayonnement est due à la dispersion de l'énergie dans une demi-sphère.
- Cas B : la masse de rayonnement est déterminée par l'absence d'écran dans la continuité du piston oscillant. La résistance de rayonnement est due à la dispersion de l'énergie dans une sphère.
- Cas C : la masse de rayonnement est déterminée par la présence d'un obstacle devant le piston, en l'absence d'écran dans la continuité du piston oscillant. La résistance de rayonnement est la même que celle du cas B (dispersion dans une sphère).



Masse de rayonnement

La transition entre le champ de vitesse du piston (vitesse normale au piston) et le champ acoustique dans l'espace libre est illustrée ci-dessous :

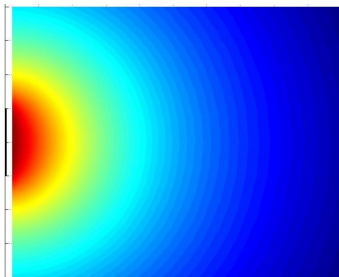


La figure de gauche représente le sinus du déphasage entre la pression et la vitesse. La pression est en quadrature au voisinage immédiat de la membrane (masse de rayonnement), puis tend à être en phase à plus grande distance (propagation).

La figure de droite représente le rapport entre la vitesse acoustique locale et celle qui correspond à une situation de propagation "pure". Une composante supplémentaire (tangentielle) domine sur les bords, car les particules de fluide y sont "chassées" vers l'extérieur plutôt que d'y être comprimées (masse de rayonnement);

Résistance de rayonnement

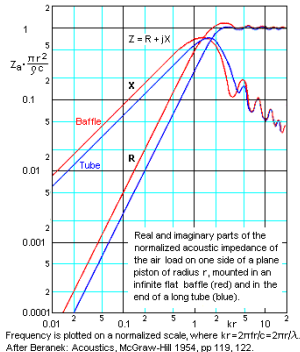
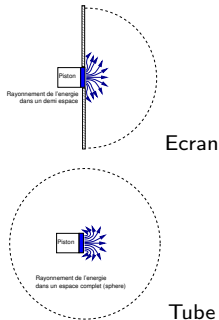
La figure ci-dessous illustre la répartition de l'intensité acoustique active au voisinage d'un piston vibrant. Elle est très élevée (en rouge) sur sa surface, avec une décroissance en allant du centre vers les bords (du fait de la vitesse tangentielle sur le bord). A plus grande distance, l'intensité décroît selon un profil qui devient rapidement sphérique, et diminue avec la distance - tendant vers zéro (en bleu).



La puissance rayonnée est conservée au cours de la propagation. A grande distance (champ "lointain"), la dépendance spatiale du champ tend vers une sphère de rayon r ; l'intensité acoustique est alors proportionnelle à $\frac{1}{r^2}$ (r étant la distance source-récepteur) et la pression acoustique est proportionnelle à $\frac{1}{r}$.

Exemples typiques

L'impédance de rayonnement d'un piston à section circulaire monté sur écran, et celle à l'extrémité d'un tube, sont présentées ci-dessous :



Dans les deux cas, la partie imaginaire (masse de rayonnement) domine aux basses fréquences, alors qu'aux hautes fréquences c'est la partie réelle qui domine, tendant vers l'impédance caractéristique (la composante normale de la vitesse est dominante).

Expression approchée de l'impédance de rayonnement

Aux "basses fréquences" (lorsque la longueur d'onde est grande devant le rayon du piston - $ka \ll 1$), l'impédance de rayonnement peut s'écrire de façon générale :

$$Z_{ar} = Z_{ac} [\alpha(ka)^2 + j\beta(ka)] = R_{ar} + j\omega M_{ar},$$

où $Z_{ac} = \frac{\rho c}{S}$ est l'impédance caractéristique en analogie pression - débit, ρ est la masse volumique de l'air ($1,2 \text{ kg/m}^3$ à 20°C), c est la célérité du son dans l'air au repos ($c \simeq 344 \text{ m/s}$ à 20°C) et $S = \pi a^2$ est la section du piston, et k est le nombre d'onde $k = \frac{\omega}{c}$.

La résistance et la masse de rayonnement s'écrivent donc :

$$\begin{aligned} R_{ar} &= Z_c \alpha (ka)^2 \\ M_{ar} &= Z_c \frac{\beta a}{c} = \beta \frac{\rho a}{S}, \end{aligned}$$

où α dépend des conditions de rayonnement (sphère, demi-sphère, ...) et β des conditions de montage du piston.

Exemples de résistance et masse de rayonnement

Aux basses fréquences, deux expressions approchées des résistances et masses de rayonnement sont souvent utilisées :

	Résistance de rayonnement	Masse de rayonnement	Correction de longueur
Sur écran	$R_{ar} = Z_c \frac{(ka)^2}{2}$	$M_{ar} = \frac{8}{3\pi} \frac{\rho a}{S}$	$\Delta l = \frac{8}{3\pi} a \simeq 0.86a$
A l'extrémité d'un tube	$R_{ar} = Z_c \frac{(ka)^2}{4}$	$M_{ar} = 0.6133 \frac{\rho a}{S}$	$\Delta l = 0.6133a$

La masse de rayonnement est parfois assimilée à celle d'un cylindre de fluide de même section que le piston/guide, et alors exprimée comme la longueur de ce cylindre ("correction de longueur").

Remarque Aux basses fréquences, $ka \ll 1$ donc $(ka)^2 < ka$. La valeur de la résistance de rayonnement R_{ar} reste donc petite par rapport à la réactance de rayonnement $X_{ar} = \omega M_{ar}$.

L'effet de charge sur une source acoustique peut ainsi être approximé par $Z_{ar} = j\omega M_{ar}$.

Pression rayonnée par une source unique

La puissance acoustique transmise par la source au milieu s'écrit

$$P_a = R_{ar} \tilde{q}^2,$$

où R_{ar} est la partie réelle de l'impédance de rayonnement et $\tilde{q}$ le débit acoustique fourni par la source. Cette puissance se propage de proche en proche, "jusqu'à l'infini". Pour une source monopolaire, le champ de pression s'écrit :

$$p(r) = j\omega\rho q \frac{e^{-jkr}}{\Omega r}$$

où q est le débit de source et Ω est l'angle solide dans lequel rayonne la source ($\Omega = 4\pi$: espace infini, $\Omega = 2\pi$: demi-espace, etc).

Commentaires

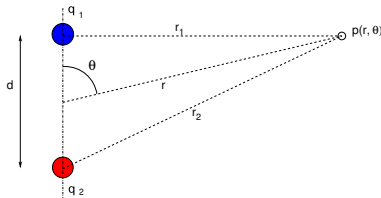
L'équation précédente montre que

- l'amplitude de la pression décroît en $1/r$, ce qui traduit l'existence d'ondes sphériques,
- elle est proportionnelle à l'accélération a_s et à la surface S de la source ($a_s S = j\omega q$),
- le temps de parcours de l'onde est $\tau = \frac{r}{c}$ (phase $\phi = -kr = -\omega\tau$).

Pression rayonnée par deux sources

Dans le cas où 2 monopôles rayonnent en milieu infini, avec deux débits q_1 et q_2 , la pression est la somme des deux contributions et s'écrit :

$$p_t(r, \theta) = p_1(r) + p_2(r) = j\omega\rho(q_1 \frac{e^{-jkr_1}}{4\pi r_1} + q_2 \frac{e^{-jkr_2}}{4\pi r_2})$$



A grande distance ($\{r_1, r_2\} \gg d$), il vient $r_1 \simeq r_2 \simeq r$ soit

$$p_t(r, \theta) = \frac{j\omega\rho}{4\pi r}(q_1 e^{-jkr_1} + q_2 e^{-jkr_2}) = jk\rho c \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} D(\theta, \phi)$$

où $D(\theta, \phi)$ caractérise la directivité du système à deux sources.

Directivité d'un système à deux sources

Le terme de directivité s'exprime en écrivant $r_1 = r - \Delta r$ et $r_2 = r + \Delta r$ et en assimilant la paire de sources à une source unique centrée en leur milieu (approximation "champ lointain"). Il s'écrit

$$\begin{aligned} D(\theta, \phi) &= q_1 e^{jk\Delta r} + q_2 e^{-jk\Delta r} \\ &\simeq (q_1 + q_2) + (q_1 - q_2)jk\Delta r \quad (\text{si } k\Delta r \ll 1). \end{aligned}$$

Commentaires

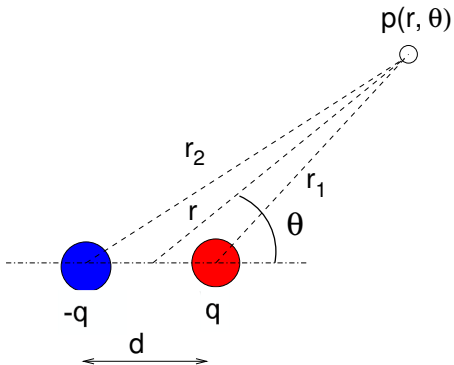
Cette équation montre que la directivité dépend

- du rapport entre l'espacement des sources d et la longueur d'onde ($k\Delta r = k\frac{d}{2} \cos \theta$).
- de l'amplitude et de la phase relative des deux sources, q_1 et q_2 étant des nombres complexes qui traduisent des différences d'amplitude et de phase.

La dépendance du terme $D(\theta, \phi)$ aux termes q_1 et q_2 va permettre de choisir une directivité (et une réponse en fréquence) pour des applications particulières.

Directivité d'un dipôle

Considérons le système de deux sources monopolaires espacées d'une distance d et générant des débits $q_1 = q$ et $q_2 = -q$. La taille des sources ainsi que l'espacement entre source sont supposés petits devant la longueur d'onde.



Directivité d'un dipôle

Champ lointain

On montre que la réponse en pression dans le plan du dipôle s'écrit en champ lointain

$$\frac{p_d(r, \theta)}{p_m(r)} \simeq 2jk\Delta r = jkd \cos \theta = j\omega \frac{d \cos \theta}{c},$$

où $p_m(r)$ est la pression générée par un monopôle de débit q :

$$p_m(r) = j\omega \rho q \frac{\exp^{-jkr}}{4\pi r}.$$

Champ proche

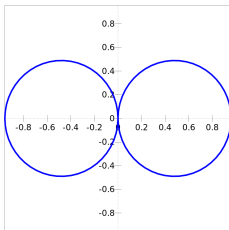
Par contre en champ proche ($d \ll r < \frac{\lambda}{6}$ [2]), on a :

$$\frac{p_d(r, \theta)}{p_m(r)} \simeq \frac{jkd \cos \theta}{jkr} = \frac{d \cos \theta}{r},$$

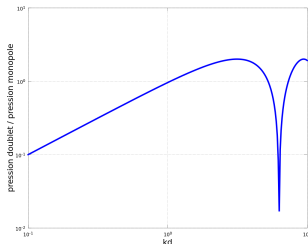
L'expression dépend de ω en champ lointain, mais pas en champ proche : c'est ce qui est appelé "effet de proximité", très utilisé en prise de son.

Champ rayonné par le dipôle

Le diagramme de directivité du dipôle est présenté à la figure ci-dessous. Le dipôle est bidirectionnel ($D(\theta) = \cos \theta$)



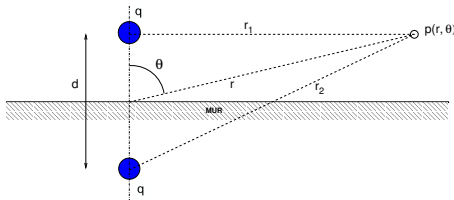
- En champ lointain : le dipôle génère un spectre de type “passe haut” du premier ordre par rapport au monopôle (cf. figure ci-dessous).
- En champ proche : le dipôle génère un spectre identique à celui du monopôle



Réponse en pression du doublet par rapport à la réponse du monopole pour $kd = 1$.

Directivité d'une source près d'un mur

Considérons une source monopolaire (enceinte de petite dimensions par rapport à la longueur d'onde) placée près d'une surface de dimensions infinies, parfaitement réfléchissante.



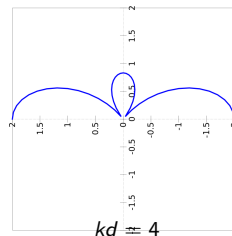
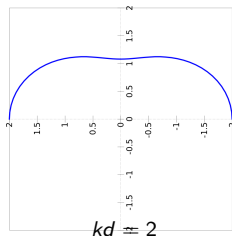
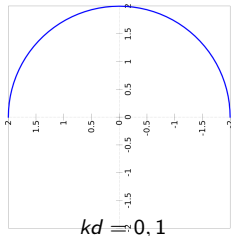
L'effet du mur peut être vu comme l'existence d'une source image produisant un débit identique à la source réelle.

Directivité d'une source près d'un mur

La réponse en pression d'un tel système s'écrit en champ lointain et aux basses fréquences ($kd \ll 1$)

$$\frac{p(r)}{p_m(r)} = 2 \cos\left(\frac{kd}{2} \cos \theta\right) \simeq 2 - \frac{(kd)^2}{2} \cos^2 \theta \quad (\text{avec } p_m(r) = j\omega\rho q \frac{\exp^{-jkr}}{4\pi r})$$

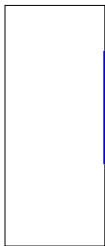
Les diagrammes de directivité du système sont présentés ci-dessous pour trois valeurs de kd .



Le principal effet du mur est de doubler la pression (ce qui correspond à la réduction de l'angle solide de rayonnement), mais l'écart fini des sources induit aussi une légère directivité, qui ne devient importante que pour $kd \geq 1$.

Enceinte close

Court-circuit

rayonnement
dipolaire
aux basses fréquencesrayonnement
monopolaireRayonnement avant
uniquement

Une surface vibrante (comme par exemple la membrane d'un HP) rayonne par ses deux faces, avec un débit opposé à l'avant et à l'arrière. La surface vibrante peut être vue aux basses fréquences comme un dipôle équivalent et le rayonnement résultant est très peu efficace (court-circuit acoustique).

Une manière simple d'améliorer le rayonnement est d'isoler l'une des faces, en la refermant par une enceinte rigide. Le seul rayonnement est alors celui de l'autre face de la surface vibrante.

Réaction de l'enceinte aux basses fréquences

Hypothèse

Nous faisons ici l'hypothèse que la plus grande dimension L de l'enceinte est petite devant la longueur d'onde. Ceci peut s'écrire $kL \ll 1$ (où k est le nombre d'onde) ou $kV^{1/3} \ll 1$ (où V est le volume de l'enceinte).

En pratique : Pour les enceintes "colonne" pour lesquelles la plus grande dimension peut être plus grande que la longueur d'onde, il est souvent nécessaire de considérer un élément de guide d'onde suivant cette longueur. Le raisonnement reste valable pour les plus basses fréquences.

Le mouvement de la surface vibrante modifie le volume dans l'enceinte, qui réagit par une variation de pression. **Aux basses fréquences, l'air dans l'enceinte est assimilable à un ressort (souplesse de l'air compris dans le volume, cf cours 2.3.2).**

Au voisinage de la membrane, la répartition de vitesse conduit à une masse de discontinuité, qui dépend de la géométrie du problème (cf cours 2.3.2).

Association avec le haut-parleur

Le couplage entre le haut-parleur et l'enceinte se traduit par l'existence

- d'une impédance de charge arrière comprenant
 - une impédance de discontinuité (masse) traduisant la rupture géométrique entre la membrane du haut-parleur et le volume de l'enceinte $j\omega M_{ab}$ (supposée similaire à la masse de rayonnement avant M_{ar}),
 - une impédance liée à la compressibilité du fluide dans l'enceinte, traduite par une compliance :
$$\frac{1}{j\omega C_{ab}},$$

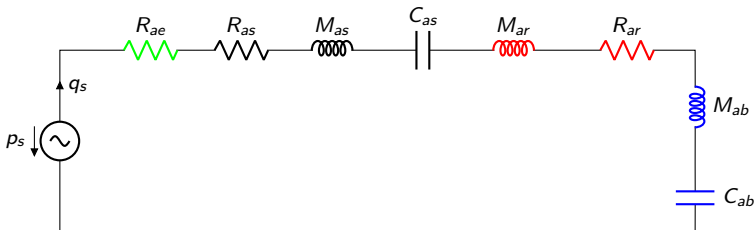
$$Z_{ab} = j\omega M_{ab} + \frac{1}{j\omega C_{ab}}$$

- une impédance de rayonnement pour la face avant $Z_{ar} = R_{ar} + j\omega M_{ar}$.

Schéma équivalent acoustique

Le schéma équivalent de l'enceinte close dans le domaine acoustique est présenté ci dessous avec les conventions de couleur suivantes :

- Vert : système électrique,
- Noir : système mécanique,
- Rouge : impédance de rayonnement (face avant),
- Bleu : enceinte close (face arrière).



Remarque : pour une enceinte "assez grande", les masses de discontinuité à l'avant et à l'arrière de la membrane sont très proches $M_{ab} \simeq M_{ar}$.

Paramètres équivalents acoustiques

Les paramètres équivalents donnés dans la figure précédente dans le domaine acoustique peuvent s'exprimer en fonction des paramètres physiques donnés à la slide 51 comme suit :

Element	Paramètres électriques	Paramètres mécaniques	Paramètres acoustiques
Résistance	$R_{ae} = \left(\frac{Bl}{S_d}\right)^2 \frac{1}{R_e}$	$R_{as} = \frac{R_{ms}}{S_d^2}$	$R_{ar} = Z_c \frac{1}{4} (kr_d)^2$
Inductance		$M_{as} = \frac{M_{ms}}{S_d^2}$	$M_{ar} = \rho \frac{\beta a}{S_d}, M_{ab} = \rho \frac{\beta a}{S_d}$
Capacitance		$C_{as} = C_{ms} S_d^2$	$C_{ab} = \frac{V_b}{\rho c^2}$

où ρ et c sont respectivement la masse volumique et la célérité du son de l'air au repos, $k = \frac{\omega}{c}$ est le nombre d'onde, et β est un coefficient caractérisant l'effet de discontinuité entre la membrane et l'air. Dans le cas d'une membrane sur écran infini, $\beta = \frac{8}{3\pi} \simeq 0.85$ et pour une membrane débouchant en espace infini $\beta \simeq 0.6133$. Par ailleurs, la pression de source s'écrit $p_s = \frac{BlU_s}{S_d R_e}$.

Pression rayonnée

La pression acoustique rayonnée par l'enceinte (supposée placée en espace infini et petite devant la longueur d'onde) s'écrit

$$p(r) = j\omega\rho q_s \frac{e^{-jkr}}{4\pi r}.$$

La réponse de l'enceinte, définie comme le rapport entre la pression rayonnée et la tension d'alimentation est donnée par $\frac{p(r)}{U_s}$ et dépend de la réponse en débit $\frac{q_s}{U_s}$ (rapport du débit généré par le haut-parleur et la tension d'alimentation).

La réponse de l'enceinte dépend donc de la réponse en accélération de la membrane :

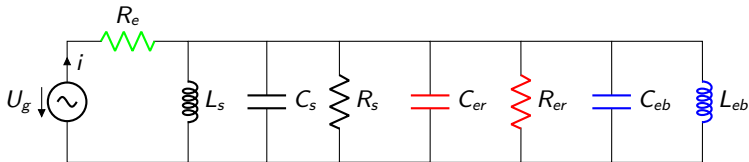
$$\frac{p(r)}{U_s} = \rho S_d \frac{a_s}{U_s} \frac{e^{-jkr}}{4\pi r}.$$

où a_s est l'accélération au centre de la membrane.

Schéma équivalent électrique

Le schéma équivalent de l'enceinte close dans le domaine électrique est présenté ci dessous avec les conventions de couleur suivantes (l'inductance électrique L_{eb} est ici négligée) :

- Vert : système électrique,
- Noir : système mécanique,
- Rouge : impédance de rayonnement (face avant),
- Bleu : enceinte close (face arrière).



Paramètres équivalents électriques

Les paramètres équivalents donnés dans la figure précédente dans le domaine électrique peuvent s'exprimer en fonction des paramètres physiques donnés à la slide 51 comme suit :

Element	Paramètres électriques	Paramètres mécaniques	Paramètres acoustiques
Résistance	R_e	$R_s = \frac{(B\ell)^2}{R_{ms}}$	$R_{er} = (\frac{B\ell}{S_d})^2 \frac{1}{R_{ar}}$
Inductance		$L_s = (B\ell)^2 C_{ms}$	$L_{eb} = (\frac{B\ell}{S_d})^2 C_{ab}$
Capacitance		$C_s = \frac{M_{ms}}{(B\ell)^2}$	$C_{er} = (\frac{S_d}{B\ell})^2 M_{ar}, C_{eb} = (\frac{S_d}{B\ell})^2 M_{ad}$

Influence de l'enceinte sur la fréquence de résonance et le facteur de qualité

La réponse en accélération de l'enceinte peut être calculée en analysant le schéma équivalent présenté à la slide 22.

La réponse en débit s'écrit

$$\frac{p_s}{q_s} = R_{ac} + j\omega M_{ac} + \frac{1}{j\omega C_{ac}}$$

où $R_{ac} = R_{ae} + R_{as} + R_{ar}$ (pertes électriques + mécaniques + acoustique par rayonnement),
 $M_{ac} = M_{as} + M_{ar} + M_{ab}$ (masses mécanique + acoustique de rayonnement et de discontinuité),
 $C_{ac} = \frac{C_{ab} C_{as}}{C_{ab} + C_{as}}$ (compliance mécanique + enceinte)

Si l'on compare cette réponse à celle d'un haut-parleur monté sur écran, le terme qui diffère est la compliance C_{ac} (en supposant que les masses et résistances de rayonnement sont identiques dans les deux cas). Ainsi, l'ajout de l'enceinte raidit le haut-parleur et modifie sa fréquence de résonance ainsi que son facteur de qualité.

La réponse en débit ou en pression est par conséquent analogue à celle sur écran, en remplaçant les paramètres (f_s , Q_{es} et Q_{ts} , cf. cours 4-1) par leurs équivalents en enceinte close (f_c , Q_{ec} et Q_{tc}).

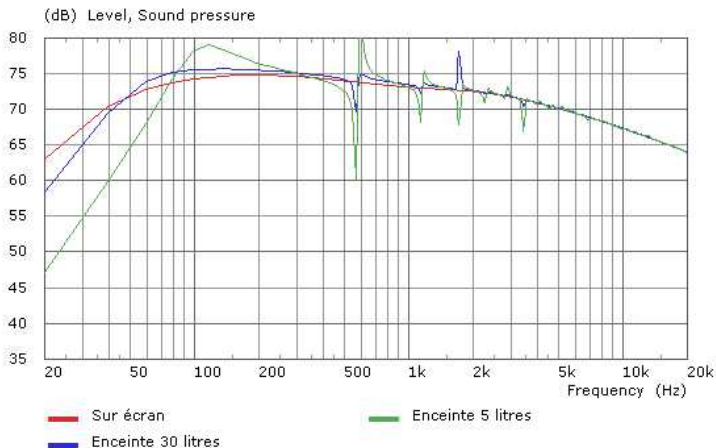
Système	Fréquence de résonance	Facteur de qualité
Haut-parleur sur écran	$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{M'_{as} C_{as}}}$	$Q_{ts} = \frac{1}{\omega_s C_{as} R_{as}}$
Haut-parleur en enceinte close	$f_c = f_s \sqrt{1 + \alpha}$	$Q_{tc} = Q_{ts} \sqrt{1 + \alpha}$

où $\alpha = \frac{C_{as}}{C_{ab}} = \frac{V_{as}}{V_{ab}}$

Note: dans le tableau précédent, la masse M'_{as} correspond à la masse acoustique totale du haut-parleur sur écran (incluant le rayonnement à l'avant et à l'arrière): $M'_{as} = M_{as} + 2M_{ar}$.

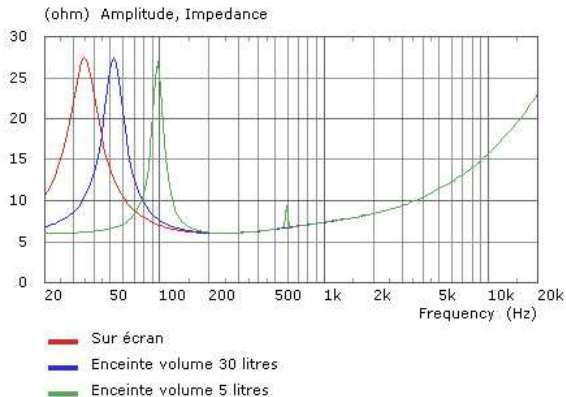
Réponse en fréquence

La réponse en fréquence de l'accélération de la membrane $\frac{a_s}{U_s}$ est présentée à la figure ci-dessous à l'aide du logiciel Akabak [3] et en utilisant le haut-parleur dont les caractéristiques sont données à la slide 52.



Impédance électrique

L'impédance électrique est présentée à la figure ci-dessous à l'aide du logiciel Akabak [3] et en utilisant le haut-parleur dont les caractéristiques sont données à la slide 52.



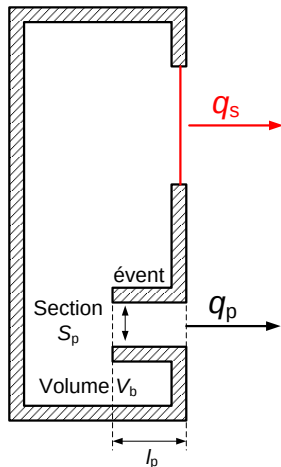
Enceinte à événement

L'enceinte à événement est un système qui utilise une charge réalisée à l'aide d'un volume et d'un événement, l'ensemble de la charge arrière jouant le rôle de résonateur de Helmholtz.

Les caractéristiques du résonateur sont :

- Volume V_b ,
- Longueur d'événement l_p ,
- Section d'événement S_p .

(l'indice 'p' signifie 'port', traduction anglaise d'événement).



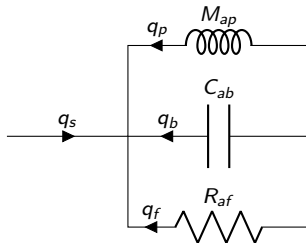
Par convention, les débits sont supposés positifs lorsque le fluide sort de l'enceinte.

Effet de l'enceinte

La face arrière du haut-parleur rayonne ainsi dans un système résonant qui présente :

- une compliance C_{ab} due à la compressibilité de l'air dans le volume,
- une masse acoustique $M_{ap} = \frac{\rho(l_p + \Delta\ell)}{S_p}$ due à l'inertie de l'air dans l'évent ('port' en anglais). Le terme $\Delta\ell$ représente la correction de longueur due aux effets de discontinuité en entrée et sortie d'évent. La résistance de rayonnement est négligée ici.
- une résistance R_{af} qui représente les fuites dans l'enceinte (souvent négligée)

La charge arrière vue par le haut-parleur peut se représenter à l'aide du schéma équivalent ci-dessous. Le débit nécessaire pour comprimer ou déprimer l'air dans le volume est l'opposé de la somme des débits $q_b = -(q_s + q_p + q_f)$. Sachant que les débits q_s, q_p, q_f sont orientés positivement vers l'extérieur de l'enceinte, ceci traduit le fait que l'air qui sort de l'enceinte crée un débit négatif, soit une décompression de l'air.



Impédance acoustique de l'enceinte

L'admittance arrière vue par le haut-parleur (en négligeant R_{af}) peut ainsi s'écrire

$Y_{ab} = j\omega C_{ab} + \frac{1}{j\omega M_{ap}}$, ce qui conduit à une impédance arrière

$$Z_{ab} = \frac{j\omega M_{ap}}{1 - (\frac{\omega}{\omega_p})^2},$$

où $\omega_p^2 = \frac{1}{M_{ap}C_{ab}}$, soit $f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_{ap}C_{ab}}}$, la fréquence de résonance du résonateur de Helmholtz ('p' désignant l'évent).

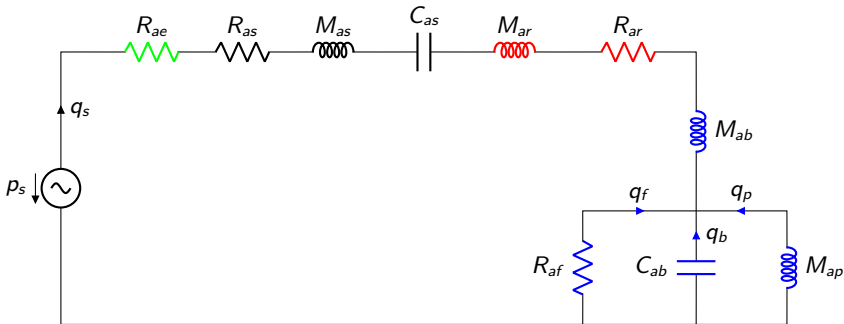
Le rapport des débits s'écrit $\frac{q_p}{q_s} = \frac{-1}{1 - (\frac{\omega}{\omega_p})^2}$.

L'analyse de l'impédance et du rapport des débits est donnée au tableau ci-dessous.

Fréquence	$\omega < \omega_p$	$\omega \simeq \omega_p$	$\omega > \omega_p$
Rapport des débits	$q_p = -q_s$	q_s maximum	$q_p \rightarrow 0$
Impédance vue par le haut-parleur	$Z_{ab} \simeq j\omega M_{ap}$	Z_{ab} maximale et résistive	$Z_{ab} \simeq \frac{1}{j\omega C_{ab}}$
Effet du résonateur	Masse ajoutée	amplification du débit	enceinte close

Combinaison des deux rayonnements

La combinaison du haut-parleur et du résonateur de Helmholtz conduit à réaliser un système à deux degrés de liberté, dont le schéma équivalent est représenté ci-dessous dans le domaine acoustique. Les conventions de couleur sont identiques à celles présentées au §22.

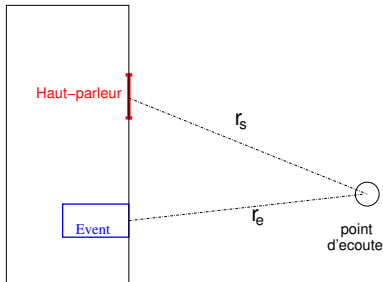


Pression rayonnée par l'enceinte

La pression rayonnée par l'enceinte est due à la contribution du haut-parleur (débit q_s) et à celle de l'évent (débit q_p). En supposant que les sources sont petites devant la longueur d'onde et que le débit q_f est négligeable, la réponse en pression s'écrit :

$$\frac{p(r)}{p_s} = jk\rho c \left(\frac{q_s}{p_s} \frac{e^{-jkr_s}}{4\pi r_s} + \frac{q_p}{p_s} \frac{e^{-jkr_e}}{4\pi r_e} \right)$$

En supposant une écoute dans l'axe ou en champ lointain, il vient $r_e \simeq r_s = r$ et la pression rayonnée est directement proportionnelle à $q_s + q_p$.



Elle s'écrit ainsi comme une fonction du débit q_b nécessaire pour comprimer l'air compris dans le volume V_b :

$$\frac{p(r)}{p_s} = j\omega\rho \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \frac{q_b}{P_s}.$$

Alignement

Le couplage entre deux systèmes résonants à un degré de liberté (haut-parleur + résonateur de Helmholtz) crée un système à deux degrés de liberté présentant deux résonances.

De fait, la réponse en pression, proportionnelle à la réponse débit $\frac{q_b}{p_s}$, est une réponse d'ordre 4 qui s'écrit de façon générale

$$p(r) = \frac{U_g}{R_e} \frac{\rho B \ell S_d}{M_{ms}} \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} G(s)$$

$$\left(\frac{j\omega}{\omega_s}\right)^4 h^{-2}$$

$$\text{où } G(s) = \frac{\left(\frac{j\omega}{\omega_s}\right)^4 h^{-2}}{\left(\frac{j\omega}{\omega_s}\right)^4 h^{-2} + \left(\frac{j\omega}{\omega_s}\right)^3 h^{-2} Q_{ts}^{-1} + \left(\frac{j\omega}{\omega_s}\right)^2 (1 + h^{-2}(1 + \alpha)) + \left(\frac{j\omega}{\omega_s}\right) Q_{ts}^{-1} + 1}$$

où $h = \frac{f_p}{f_s}$. On peut identifier cette expression à un gabarit de filtre passe-haut d'ordre 4 présentant une pente de 24 dB/oct:

$$G(s) = \frac{s^4}{s^4 + d_3 s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + d_0}, \text{ en notant } s = j\omega.$$

Il est donc nécessaire de choisir les dimensions du résonateur de Helmholtz de telle façon que le débit généré par l'évent ne soit ni trop grand ni trop petit pour obtenir une réponse convenable aux basses fréquences, c'est à dire ne montrant pas de résonance trop marquée, ce qui générerait des effets de traînage au voisinage de la fréquence de résonance du caisson.

Pour cela, on utilise des réponses de filtre d'ordre 4 connus et on cherche à identifier les termes de la réponse théorique de l'enceinte aux termes de la réponse du filtre. Ainsi, on peut déterminer des "réponses-types" d'enceinte à évent qui permettent de déterminer rapidement la géométrie de l'enceinte en fonction des paramètres du haut-parleur.

Quelques alignements classiques sont donnés ci-dessous (des valeurs supplémentaires sont disponibles dans Beranek [2]).

Alignement	f_{-3}/f_s	V_b/V_{as}	Q_{ts}	f_b/f_s
Sub-Butterworth	1.7748	0.4028	0.3010	1
Butterworth	1	0.9422	0.405	1
Chebyshev (0.01 dB ripple)	0.8143	1.5511	0.4572	0.8838
Chebyshev (0.25 dB ripple)	0.6374	2.9747	0.5553	0.7259

Table: Quelques valeurs utilisées pour le dimensionnement des enceintes à évent. f_s est la fréquence de résonance du haut-parleur, f_{-3} est la fréquence de coupure à 3 dB de l'enceinte, V_b est le volume de l'enceinte, V_{as} est le paramètre du haut-parleur associé à sa souplesse mécanique, Q_{ts} est le coefficient de qualité total du haut-parleur, f_b est la fréquence de résonance du résonateur de Helmholtz.

Calcul des paramètres d'une enceinte

Les dimensions d'une enceinte à évent peuvent être déterminées à l'aide d'abaques ou par calcul numérique.

Calcul par abaques

- Utiliser la figure 1 qui est une extension du tableau 1 [4].
- Partir du Q_{ts} du haut-parleur 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 $h = f_p / f_s$. Calculer la fréquence de résonance de l'enceinte $f_p = h \cdot f_s$.
- En déduire la valeur de q . Calculer la fréquence de coupure à -3 dB $f_{-3} = q f_s$.

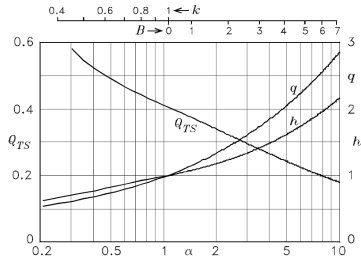


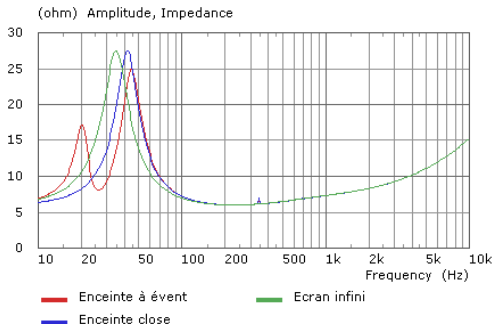
Figure: Abaque permettant la détermination des dimensions d'une enceinte à évent

Calcul des paramètres d'une enceinte

Calcul numérique Dans ce cas, il est possible divers logiciels de simulation d'enceintes, comme par exemple ceux cités sur cette page <http://www.speakerbuilding.com/software/>.

Exemple de calcul d'une enceinte : impédance électrique

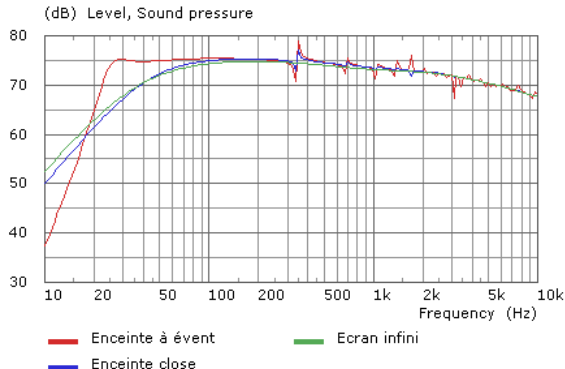
Un exemple de calcul est donné pour le haut-parleur Visaton 170S. Le volume d'enceinte considéré est ici 95 ℓ et les dimensions de l'évent sont : longueur = 11 cm, diamètre = 6 cm), ce qui conduit à une fréquence de résonance du résonateur de Helmholtz de 27,5 Hz environ. L'impédance électrique est présentée sur la figure ci-contre.



L'impédance de l'enceinte à événement montre deux pics qui traduisent l'existence de deux résonances, contrairement à ce qui se passe sur écran ou enceinte close.

Exemple de calcul d'une enceinte : réponse en pression

La réponse en pression à 1 mètre est présentée sur la figure ci-dessous pour le même haut-parleur (Visaton 170S) monté dans trois configurations différentes. L'enceinte possède les mêmes caractéristiques que précédemment et sa plus grande longueur interne est 50 cm.



Analyse de la simulation

La réponse calculée montre clairement l'effet de l'enceinte à événement sur la réponse du système. Dans le cas de l'enceinte close, la fréquence de coupure à -3 dB est de l'ordre de 45 Hz et la pente de l'ordre de 12 dB/octave. Pour l'enceinte à événement, la fréquence de coupure à -3 dB est de l'ordre de 25 Hz et la pente est de l'ordre de 24 dB / octave.

Par ailleurs, les accidents apparaissant au dessus de 300 Hz sont dus aux effets de résonance dans le volume. L'amplitude de ces résonances est probablement sur estimée dans la simulation.

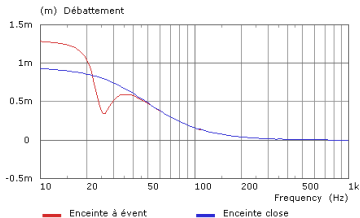
Débattement de la membrane du haut-parleur

En savoir +

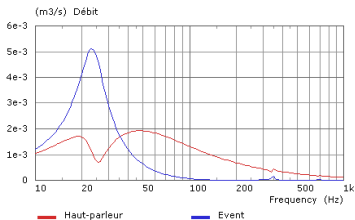
- Enceinte close : dans le cas d'une enceinte close, le débattement de la membrane du haut-parleur est constant jusqu'à la fréquence de résonance puis décroît avec une pente de 12 dB / oct.
- Enceinte à événement : l'enceinte à événement présente aux très basses fréquences une impédance de type "inertielle". Au dessous de la fréquence de résonance du résonateur de Helmholtz, le haut-parleur doit pousser la masse d'air située sur sa face arrière. Il crée alors deux débits en opposition de phase (celui de la membrane du haut-parleur et celui de l'événement). A ces fréquences, le haut-parleur "fait du vent" et possède un grand débattement. Le débattement devient minimum à la fréquence de résonance du résonateur de Helmholtz, pour laquelle l'énergie mécanique est transmise de façon optimale à l'enceinte.

Débattement de la membrane du haut-parleur : exemple

Un exemple de calcul de débattement est montré à la figure ci-dessous pour le haut-parleur Visaton 170S monté dans les enceintes présentées précédemment (39)



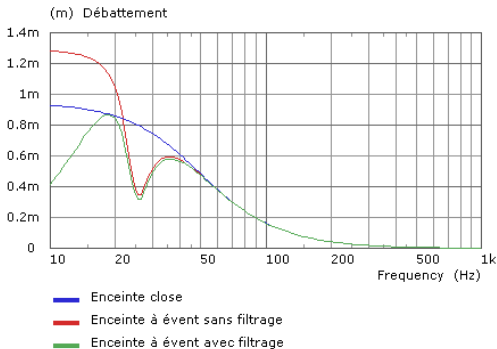
Pour l'enceinte à événement, les débits générés par le haut-parleur et l'événement sont présentés à la figure ci-dessous. Cette figure montre clairement le rôle assuré par l'événement pour compenser le faible déplacement du haut-parleur à la fréquence de résonance.



filtrage actif d'une enceinte à évent

En savoir + De façon à limiter le débattement de la membrane du haut-parleur, il est courant d'utiliser un filtre passe-haut en amont du haut-parleur. La fréquence de coupure d'un tel filtre étant basse (20 à 30 Hz), il est préférable d'utiliser un filtre actif.

Un exemple de débattement est montré à la figure ci-dessous pour le haut-parleur d'étude monté en enceinte close, en enceinte à évent sans filtrage et en enceinte à évent munie d'un filtre de Sallen & Key de fréquence de coupure 17 Hz.



Conclusion - Rayonnement d'un haut-parleur

Un haut-parleur qui rayonne dans un espace donné (défini par son angle solide), voit une impédance acoustique, appelée impédance de rayonnement qui comprend aux basses fréquences ($ka < 1$, où k est le nombre d'onde et a le rayon du haut-parleur) :

- **Une résistance de rayonnement.** La résistance de rayonnement dépend des conditions de rayonnement en champ lointain (angle solide dans lequel la puissance acoustique est délivrée). Pour un angle solide de 4π steradians (rayonnement dans une sphère), la résistance de rayonnement est proportionnelle à $\frac{(ka)^2}{4}$. Pour un angle solide de 2π (demi espace), la résistance de rayonnement est double et est proportionnelle à $\frac{(ka)^2}{2}$.
- **Une masse de rayonnement.** La masse de rayonnement dépend de la géométrie de la discontinuité entre le haut-parleur et le milieu ambiant.

Conclusion - Haut-parleur en enceinte close (1)

Un haut-parleur monté en enceinte close voit

- sur sa face avant : l'impédance de rayonnement
- sur sa face arrière : l'impédance de discontinuité (masse acoustique) en série avec l'impédance acoustique de la cavité.
 - Aux basses fréquences la cavité étanche est vue comme une souplesse acoustique
 - Aux plus hautes fréquences, les modes propres de la cavité font apparaître des résonances internes modifiant l'impédance vue par le haut-parleur. En général les modèles électroacoustiques prennent en compte les résonances existant suivant la plus grande dimension de l'enceinte à l'aide des modèles de guides d'ondes (cf. cours 2.3).

Conclusion - Haut-parleur en enceinte close (2)

La réponse du système complet (haut-parleur + enceinte close) est la suivante :

- L'impédance électrique présente une seule résonance dont la fréquence et le facteur de qualité sont plus élevés que la fréquence et le facteur de qualité de l'impédance électrique du haut-parleur monté sur écran.
- La réponse en pression est un filtre passe haut d'ordre 2 (pente de 12 dB/octave) dont la fréquence de résonance et le facteur de qualité sont plus élevés que ceux du haut-parleur monté sur écran. Aux hautes fréquences, la réponse en pression peut comporter des accidents dus aux résonances internes de l'enceinte (qu'il est possible d'amortir à l'aide de matériau absorbant).

Conclusion - Haut-parleur en enceinte à événement (1)

Une enceinte à événement est une cavité couplée à un tube, l'ensemble jouant le rôle de résonateur de Helmholtz pour renforcer l'émission des basses fréquences.

Un haut-parleur monté en enceinte à événement voit

- sur sa face avant : l'impédance de rayonnement
- sur sa face arrière : l'impédance de discontinuité (masse acoustique) en série avec l'impédance acoustique du résonateur de Helmholtz.
 - Aux basses fréquences l'enceinte à événement est vue comme un résonateur de Helmholtz présentant une résonance acoustique.
 - Aux plus hautes fréquences, les modes propres de la cavité font apparaître des résonances internes modifiant l'impédance vue par le haut-parleur. Par ailleurs, l'événement peut aussi présenter des résonances acoustiques suivant sa longueur (fréquences de résonance $f_r = \frac{c}{2l_p}$, où c est la célérité du son et l_p la longueur effective de l'événement prenant en compte les corrections de longueur dues au rayonnement et à la discontinuité).

Conclusion - Haut-parleur en enceinte à événement (2)

Aux basses fréquences, le système complet (haut-parleur + enceinte à événement) est un système à deux degrés de liberté, présentant ainsi deux fréquences de résonances.

Attention

Les fréquences de résonance du système complet sont différentes de la fréquence de résonance du haut-parleur seul et de la fréquence de résonance du résonateur de Helmholtz.

- L'impédance électrique présente deux résonances. La fréquence pour laquelle la valeur de l'impédance électrique est minimale (entre les deux résonances) est très proche de la fréquence de résonance du résonateur de Helmholtz.
- La réponse en pression est un filtre passe haut d'ordre 4 (pente de 24 dB/octave) qui est ajustée en comparant la réponse théorique à des gabarits de filtres électriques d'ordre 4 (alignements). Aux hautes fréquences, la réponse en pression peut comporter des accidents dus aux résonances internes de l'enceinte (qu'il est possible d'amortir à l'aide de matériau absorbant) et aux résonances de l'événement.

Bibliographie



M. Rossi, *Audio*, Chap. 9.2, Presses Polytechniques Fédérales de Lausanne, 2007



L L Beranek, *Acoustics*, American Institute of Physics, 1990.



J Panzer, *Akabak*, <http://www.randteam.de/AkAbak/Index.html>



R.H. Small, *Vented-Box Loudspeaker Systems Part 1: Small-Signal Analysis*, Journal of the Audio Engineering Society, 1973 <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=1967>



L L Beranek and T Mellow, *Acoustics: sound fields and transducers*, Academic Press, 2012.

Paramètres d'un haut-parleur

Les paramètres d'un haut-parleur sont notés dans cette partie

- Paramètres électriques de la bobine
 - Résistance R_e [Ω]
 - Inductance L_e [H]
 - Impédance électrique de la bobine : $Z_e = R_e + j\omega L_e$
- Paramètres mécaniques de l'équipage mobile
 - Souplesse C_{ms} [m/N]
 - Masse M_{ms} [kg]
 - Résistance R_{ms} [kg/s]
 - Impédance mécanique : $Z_{ms} = R_{ms} + j\omega M_{ms} + \frac{1}{j\omega C_{ms}}$
- Paramètres de couplage
 - Facteur de force $B\ell$ [$T.m$] [N/A]
 - Surface équivalente de la membrane S_d [m^2]
 - Rayon équivalent de la membrane a [m]

Paramètres du haut-parleur

Le haut-parleur utilisé pour illustrer les réponses d'enceintes est le Visaton 170S dont les paramètres sont (f_u : fréquence de coupure BF dépendant de l'enceinte) :

Description	Grandeur	Valeur	Unité
Rated power	P_n	50	W
Maximum power	P_{max}	80	W
Nominal impedance	Z	8	Ω
Frequency response	BW	f_u -8000	Hz
Mean sound pressure level	L_p	86	dB (1 W/1 m)
Opening angle (-3 dB)	θ	72	$^\circ$ /4000 Hz
Excursion limit	X_{max}	± 10	mm
Resonance frequency	f_s	36	Hz
Magnetic induction	B	1.0	T
Voice coil diameter	$\emptyset$	25	mm
Height of winding	h	12.5	mm
D.C. resistance	R_e	5.9	Ω
Mechanical Q factor	Q_{ms}	2.43	
Electrical Q factor	Q_{es}	0.66	
Total Q factor	Q_{ts}	0.52	
Equivalent volume	V_{as}	38	l
Effective piston area	S_d	129	cm ²
Dynamically moved mass	M_{ms}	13	g
Force factor	$B\ell$	5.4	T.m
Inductance of the voice coil	L_e	1.2	mH