De la puce à l'oreille

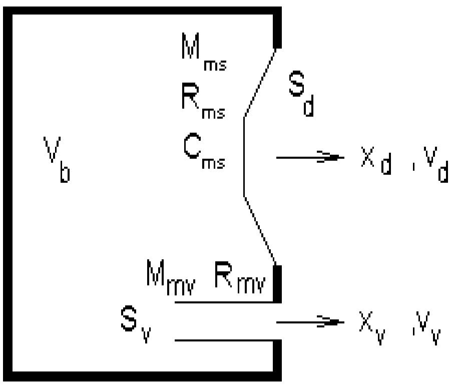
- Jean-Claude BODOT -

- L'Enceinte Bass reflex -

----------------- Simplifiée ------------------

1- Introduction

Dans sa forme la plus élémentaire, elle est constituée d'un haut parleur et d'une boite ouverte vers l'extérieur, à travers un évent souvent cylindrique. Toutefois, cet évent peut être laminaire, pavillonnaire etc. L'évaluation de ses paramètres dépendra de sa géométrie.
Son schéma de principe est le suivant :



M_{ms}, R_{ms} et C_{ms} sont respectivement la masse, la résistance et la compliance mécaniques du haut-parleur. S_d sa surface , x_s le déplacement et v_s la vitesse, instantanés de sa membrane.
V_b est le volume de la boite.
M_{mv}, R_{mv} la masse et la résistance de frottement mécaniques de l'évent. S_v sa surface , x_v le déplacement et v_v la vitesse, instantanés de l'air que l'évent véhicule.
Les parois de l'enceinte ainsi que l'évent sont considérées infiniment rigides.
Dans ce seul cas le volume d'air pris en compte à chaque instant est :

$$\Delta V_b = S_d . x_d + S_v . x_v \qquad \text{(BR-1)}$$

La transformation est adiabatique (sans échange de chaleur) et réversible. Elle est régie par l'équation de Laplace et permet d'écrire : $\Delta P = -\gamma . P_o \, \Delta V_b / V_b$ (BR-2)

Or $\gamma . P_o = \rho c^2$, (Les éléments d'acoustique)
ρ est la masse volumique de l'air à la température considérée et c la célérité du son à cette même température.
donc $\gamma . P_o / V_b = 1/C_{ab}$, avec C_{ab} la compliance acoustique de la boite. (BR-3)

L'équation fondamentale de la dynamique appliqué à la membrane du haut parleur et exprimée à travers l'opérateur p = d/dt

$$p^2 . M_{ms} . x_d + p.R_{ms}.x_d + x_d/C_{ms} + (\rho c^2 \; S_d \; (S_d.x_d + S_v . X_v)/V_b) = B.l.i \qquad \text{(BR-4)}$$

B.l est le facteur de force du haut-parleur et i l'intensité instantanée du courant qui traverse la bobine mobile.

La mise en facteur de $S_d.x_d$ dans le 4° terme de BR-4

$$p^2.\ M_{ms}.\ x_d + p.R_{ms}.x_d + x_d/C_{ms} + \left[\ \rho\ c^2\ S_d^2\ x_d\ .\left(1 + (S_v.\ x_v/S_d.x_d)\right)/V_b\right] = B.l.i$$

Adoptons $k_s=S_v/S_d$ (BR-5)

et, $k_x= x_v/x_d$ (BR-6)

La précédente formule devient :

$$\mathbf{p}^2.\ M_{ms}.\ x_d + \mathbf{p}.R_{ms}.x_d + x_d/C_{ms} + \left(x_d\ (S_d^2\ /C_{ab})\ (1+ k_s.k_x)\right) = B.l.i$$

or $S_d^2\ /C_{ab}= 1/C_{mb}$

et ainsi

$$\mathbf{p}^2.\ M_{ms}.\ x_d + \mathbf{p}.R_{ms}.x_d + x_d/C_{ms} + \left((x_d\ /C_{mb})\ (1+ k_s.k_x)\right) = B.l.i$$

Dans laquelle la force F_b de réaction de la boite. $F_b=x_d.\ (1+ k_s.k_x)/C_{mb}$ **(BR-7)**

Cette même équation fondamentale de la dynamique, appliquée à l'évent permet d'écrire :

$$\mathbf{p}^2.M_{mv}.x_v + \mathbf{p}.R_{mv}.x_v + \rho.c^2.S_v.(S_d.x_d + S_v.x_v)/V_b=0 \quad \text{(BR-8)}$$

qui, après transformation et identification devient :

$$\mathbf{p}^2.M_{mv}.x_v + \mathbf{p}.R_{mv}.x_v + k_s^2.x_v/C_{mb}= -k_s.x_d/C_{mb} \quad \text{(BR-9)}$$

fait ressortir $k_x =- 1/k_s\left[1 + (\mathbf{p}.\ R_{mv}.C_{mb}/ks^2) + (\mathbf{p}^2.M_{mv}.C_{mb}/k_s^2)\right]$ (BR-10)

reportée dans BR-7 , $F_b=\left[\ x_d/C_{mb}\right]\ \left[1- 1/\left(1 + (\mathbf{p}.\ R_{mv}.C_{mb}/ks^2) + (\mathbf{p}^2.M_{mv}.C_{mb}/ks^2)\right)\right]$ (BR-11)

Remarque 1 :

L' équation BR-11 fait apparaître le couplage entre la boite et son évent , à travers les indices des produits $R_{mv}.C_{mb}$ d'une part et $M_{mv}.C_{mb}$ d'autre part.

Remarque 2 :

L'élimination du carré de k_s est possible en transposant les grandeurs mécaniques en grandeurs acoustiques (voir les analogies électro, mécano, acoustiques).

$$R_{mv}.C_{mb}/k_s^2=(R_{mv}/S_v^2)\ .\ (C_{mb}.\ S_d^2) = R_{av}.\ C_{ab} \quad \text{(BR-12)}$$

$$M_{mv}.C_{mb}/k_s^2=(M_{mv}/S_v^2).(C_{mb}.\ S_d^2)=M_{av}.C_{ab} \quad \text{(BR-13)}$$

Et $F_b=\left[\ x_d/C_{mb}\right]\ \left[1- 1/\left(1 + \mathbf{p}.\ R_{av}.C_{ab}+ \mathbf{p}^2.M_{av}.C_{ab}\right)\right]$ (BR-14)

Ainsi la fréquence d'accord et le coefficient de qualité ,du couple boite + évent apparaissent clairement dans l'expression $1 + p.\ R_{av}.C_{ab}+ p^2.M_{av}.C_{ab}$ présente dans BR-14

Elle peut s'écrire $(1 - \omega^2.M_{av}.C_{ab}) + j\ .\omega.\ R_{av}.C_{ab}$ expression complexe de la forme $\mathbf{a} + j.\mathbf{b}$

La pulsation caractéristique telle que la partie réelle **a** s'annule

$$\omega_b^2.M_{av}.C_{ab} =1$$

C'est la formule de THOMSON appliquée à un milieu acoustique,

Elle conduit à la valeur de cette pulsation correspondant à l'accord de l'enceinte ,

$$\omega_b=1/(\ M_{av}.C_{ab})^{1/2} \quad \textbf{(BR-15)}$$

Le coefficient de qualité de la boite est alors déterminé et vaut

$$Q_b=M_{av}.\ \omega_b/R_{av}\ \text{ ou }\ Q_b=1/.\omega_b.\ R_{av}.C_{ab}\ \text{ ou encore }\ Q_b=(1/R_{av}).(M_{av}/C_{ab})^{1/2} \quad \textbf{(BR-16)}$$

BR-14 peut maintenant s'écrire

$$F_b=\left[\ x_d/C_{mb}\right]\ \left[1- 1/\left(1 + \mathbf{p}/\omega_b.Q_b+ \mathbf{p}^2/\omega_b^2\right)\right] \quad \text{(BR-17)}$$

Tout cet ensemble est, bien sur alimenté, par un amplificateur délivrant une tension instantanée u et une impédance de sortie, que nous identifierons à une résistance pure R_g.
Si R_e est la résistance électrique de la bobine mobile, L_e son inductance, la loi des mailles permet d'écrire :

$u = R_e.i + R_g.i + p.L_e.i + \mathbf{p}.B.l.x_d$ **(BR-18)**

2 - Modèle mécanique

Il nécessite la connaissance du courant instantané circulant dans la bobine mobile afin d'en effectuer le report dans BR-4.
En posant $R_{et} = R_e + R_g$
De BR-18 nous tirons $i.R_{et}.(1 + p.L_e/R_{et}) = u - \mathbf{p}.B.l.x_d$ (BR-19)
ou nous reconnaîtrons $\tau_{et} = L_e/R_{et}$, (BR-20)
la constante de temps, de la bobine mobile et du générateurs associés,
déterminant la pulsation ω_{et} de coupure électrique de l'équipage mobile.

$$\omega_{et} = 1/\tau_{et} \quad \textbf{(BR-21)}$$

La valeur de $i = \left[(u/R_{et}) - (\mathbf{p}.B.l.x_d/R_{et})\right] . \left[1/(1 + \mathbf{p}.\tau_{et})\right]$ **(BR-22)**

Sans vouloir compliquer l'analyse , mais afin de généraliser au plus vite,
$i = \left[{}^{u}/_{R_{et}} - {}^{p.B.l.x_d}/_{R_{et}}\right] . T_{et(p)}$ **(BR-23)**

ou, $T_{et(p)} = 1/(1 + p.\tau_{et})$ est la fonction de transfert d'un filtre passe bas du 1° ordre.

Aux fréquences inférieures à la fréquence de coupure électrique de la bobine mobile, soit aux $f \ll f_{et} = \omega_{et}/(2.\Pi.\tau_{et}) = 1/(2.\Pi.\tau_{et})$, $T_{et(p)}$ est peu différent de 1 (cf. Le filtrage) et ainsi il est possible de se limiter à :

$$i = \left[(u/R_{et}) - (\mathbf{p}.B.l.x_d/R_{et})\right] \quad \text{(BR-24)}$$

Remarque:
Cette restriction n'est valable que pour l'analyse isolée du couple enceinte + HP.
S'il est associé à d'autres , pour obtenir une séparation précise entre les voies d'un système multiple, il est toujours nécessaire de considérer $T_{et(p)}$. (cf. Les filtres de séparations).

En reportant l'équation BR-11 dans BR-4

$B.L.i = \mathbf{p}^2.M_{ms}.x_d + \mathbf{p}.R_{ms}.x_d + x_d/C_{ms} + \left[x_d/C_{mb}\right]\left[1 - 1/\left(1 + (\mathbf{p}.R_{mv}.C_{mb}/k_s^2) + (\mathbf{p}^2.M_{mv}.C_{mb}/k_s^2)\right)\right]$ (BR-25)

En associant BR-23

$$B.l.(u/R_{et}).T_{et(p)} = (\mathbf{p}^2.M_{ms}.X_d) + (\mathbf{p}.R_{ms}.x_d) + (\mathbf{p}.B^2.l^2.x_d.T_{et(p)}/R_{et}) + x_d/C_{ms} + \ldots$$
$$\left[x_d/C_{mb}\right]\left[1 - 1/\left(1 + \mathbf{p}.R_{mv}.C_{mb}/k_s^2 + \mathbf{p}^2.M_{mv}.C_{mb}/k_s^2\right)\right] \quad \text{(BR-26)}$$

La mise en facteur de x_d s'impose et ainsi :

$$B.l.(u/R_{et}).T_{et(p)} = x_d.\left[\mathbf{p}^2.M_{ms} + \mathbf{p}.R_{ms} + (\mathbf{p}.B^2.l^2.T_{et(p)}/R_{et}) + 1/C_{ms} + \ldots\right.$$
$$\left.\left[1/C_{mb}\right]\left[1 - 1/\left(1 + (\mathbf{p}.R_{mv}.C_{mb}/k_s^2) + (\mathbf{p}^2.M_{mv}.C_{mb}/k_s^2)\right)\right]\right] \quad \text{(BR-27)}$$

Or $x_d = v_d/p$, et BR-27 devient:

$$B.l.(u/R_{et}).T_{et(p)} = v_d\left[p.M_{ms} + R_{ms} + (B^2.l^2.T_{et(p)}/R_{et}) + 1/p.C_{ms} + \ldots\right.$$
$$\left.\left[1/p.C_{mb}\right]\left[1 - 1/\left(1 + (p.R_{mv}.C_{mb}/k_s^2) + (p^2.M_{mv}.C_{mb}/k_s^2)\right)\right]\right] \quad \text{(BR-28)}$$

Ces deux dernières équations nécessitent d'être explicitées.

En fait le processus d'analyse est le même que pour le HP seul ou couplé à une enceinte close.
Par analogie nous recherchons l'élément générateur, son débit et les éléments récepteurs.

Vu que $u/R_{et}= i$, (BR-29)

B.I. (u/R_{et}). $\mathbf{T}_{et(p)}$ est le générateur de force F du système. (BR-30)

En simplifiant BR-28 puis en identifiant les nouveaux termes , la clarté apparaîtra.
En nous souvenant qu'une impédance mécanique est égale au rapport d'une force sur une vitesse

$$F=v_d .(Z_{ms}+Z_{me}+Z_{mb}) \tag{BR-31}$$

La vitesse v_d circule donc dans un circuit série constitué de Z_{ms} , Z_{me} et Z_{mb}.
Or Z_{me} est intimement lié au circuit mécanique du HP et afin de discerner ce dernier à son enceinte on peut écrire $F=v_d .(Z_{mt} + Z_{mb})$ ou conformément à ce qui précède,

$Z_{mt}=Z_{ms}+Z_{me}$. (BR-32)

- **Identification de Z_{ms}**

$Z_{ms}= \mathbf{p}.M_{ms} + R_{ms} + 1/\mathbf{p}.C_{ms}$ (BR-33)

$Z_{ms}=(\mathbf{p}^2.M_{ms}. C_{ms} + p.C_{ms}.R_{ms} + 1) / \mathbf{p}.C_{ms}$

D'ou l'on tire $\omega_s =(M_{ms}.C_{ms})^{-1/2}$ la pulsation de résonance du HP **(BR-34)**

Et $Q_{ts} =M_{ms}. R_{ms}/\omega_s$ le coefficient de surtension mécanique du HP **(BR-35)**

- **Identification de Zme**

$Z_{me}=B^2.l^2.T_{et(p)} /R_{et}$

Le facteur de force est analogue à une résistance (de giration) (cf. Le HP électrodynamique)
donc $R_{met}= B^2.l^2/R_{et}$ (BR-36)

Remarque 1:

$R_{met}= B^2.l^2/R_{et} = B^2.l^2/(R_e + R_g) = 1/[(R_e/B^2.l^2) + (R_g/B^2.l^2)]$ (BR-37)

En appelant $R_{me}= B^2.l^2/R_e$ (BR-38)

Et $R_{mg}= B^2.l^2/R_g$ (BR-39)

R_{met} correspond à l'association parallèle de R_{me} et R_{mg} soit, $1/R_{met}=1/R_{me} + 1/R_{mg}$ **(BR-40)**

Remarque 2 **:**Dans le cas peu probable, ou $R_g=0$, les résistances de sortie de l'amplificateur et celle liée au câblage sont considérées comme nulles et implique $R_{met}= R_{me}$
$T_{et(p)}$ traduit la présence d'une compliance C_{me} en dérivation sur R_{met} remplissant la condition

$$C_{me}.R_{met}=\tau_{et} \tag{BR-41}$$

Conformément à la remarque 2, si $Rg=0$, $C_{me}.R_{met}=C_{et}.R_{em} =\tau_e$ (BR-42)

- **Identification de Zmb**

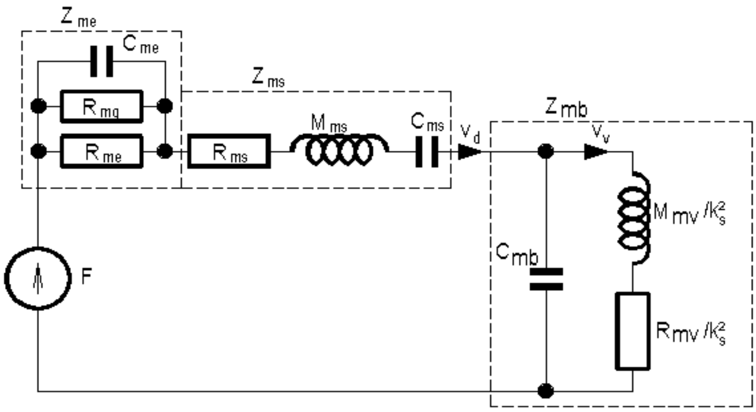
$$Z_{mb}= \left[1/\mathbf{p}.C_{mb}\right] \left[1- 1/\left(1 + \mathbf{p}. R_{mv}.C_{mb}/k_s^2 + \mathbf{p}^2.M_{mv}.C_{mb}/k_s^2\right)\right] \tag{BR-43}$$

Après transformation :

$$Z_{mb}= \left[\left(R_{mv}/k_s^2 + p.M_{mv}/k_s^2\right)/\left(1 + p. R_{mv}.C_{mb}/k_s^2 + p^2.M_{mv}.C_{mb}/k_s^2\right)\right] \tag{BR-44}$$

C'est l'équation d'un circuit que nos anciens qualifiaient de circuit bouchon .

- Schéma mécanique équivalent



-

3 Mouvements

- **Retour au déplacement du diaphragme.**

Afin de rendre plus lisible l'équation BR-27 il est nécessaire de la traduire en employant les paramètres mesurables généralement fournis par les constructeurs.

La mise en facteur de $1/C_{ms}$ dans le second membre de l'équation, éclairci déjà.

$$B.l.\ (u/R_{et}).\ T_{et(p)} = (x_d/C_{ms})\Big[p^2.\ M_{ms}.C_{ms} + p.R_{ms}.C_{ms} + p.R_{met}\ .\ C_{ms}.\ T_{et(p)} + 1 + \ldots$$
$$\Big[C_{ms}/C_{mb}\Big]\Big[1 - 1/\big(1 + (p/\omega_b.\ Q_b) + (p^2/\omega_b^2)\big)\Big]\Big] \qquad \text{(BR-45)}$$

Après la prise en compte de BR-34 et BR-35

$$B.l.\ (u/R_{et}).\ T_{et(p)} = (x_d/C_{ms})\Big[(p^2/\omega_s^2) + (p/\omega_s.\ Q_{ms}) + (p.\ T_{et(p)}/\omega_s.Q_e) + 1 + \ldots$$
$$\Big[C_{ms}/C_{mb}\Big]\Big[\big(p/\omega_b.\ Q_b + p^2/\omega_b^2\big)/\big(1 + p/\omega_b.\ Q_b + p^2/\omega_b^2\big)\Big]\Big] \qquad \text{(BR-46)}$$

Avec $Q_e = 1/\ R_{met}\ .\ C_{ms}$

Qui , si la résistance $R_g=0$, devient $Q_{es} = 1/\ R_{me}\ .\ C_{ms}$

Q_{es} est le coefficient de surtension électrique du haut parleur seul, alors que :

Q_e est le coefficient de surtension électrique du groupe HP, câblage et ampli. (cf. Le HP électrodynamique)

En convenant (cf. Le HP électrodynamique) que le rapport

$$C_{ms}/C_{mb} = V_{as}/V_b = k_v \qquad \textbf{(BR-47)}$$

BR-46 s'écrit.

$$B.l.\ (u/R_{et}).\ T_{et(p)} = (x_d/C_{ms})\Big[(p^2/\omega_s^2) + (p/\omega_s)(1/Q_{ms} + 1/Q_e) + 1 + \ldots$$
$$k_v\Big[\big((p/\omega_b.\ Q_b) + (p^2/\omega_b^2)\big)/\big(1 + (p/\omega_b.\ Q_b) + (p^2/\omega_b^2)\big)\Big]\Big] \qquad \text{(BR-48)}$$

ou encore

$$B.l.\ (u/R_{et}).\ T_{et(p)} = (x_d/C_{ms})\Big[(p^2/\omega_s^2) + (p/Q_t.\omega_s) + 1 + \ldots$$
$$k_v\Big[\big((p/\omega_b.\ Q_b) + (p^2/\omega_b^2)\big)/\big(1 + (p/\omega_b.\ Q_b) + (p^2/\omega_b^2)\big)\Big]\Big] \qquad \text{(BR-49)}$$

avec $1/Q_t = 1/Q_{ms} + 1/Q_e$ **(BR-50)**

si $R_g=0$, BR-50 devient $1/Q_{ts} = 1/Q_{ms} + 1/Q_{es}$ **(BR-51)**

Q_{ts} est le coefficient de surtension total du HP seul.

Q_t est le coefficient de surtension total du HP et de son environnement électrique. (cf. Le HP électrodynamique).
Généralisée aux valeurs maximales des déplacements X_d et de l'amplitude maximale U du générateur électrique:

$$X_d = \left(B.l.U.\, C_{ms}/R_{et} \right) T_{et(p)} .\, T_{d(p)} \qquad \text{(BR-52)}$$

Traduire $T_{d(p)}$ clairement amène à paramétrer ω_b par rapport à ω_s de telle sorte que

$$\alpha = \omega_b/\omega_s = f_b/f_s \qquad \textbf{(BR-53)}$$

Et poser **s**= **p**/ω_s. **(BR-54)**
Attention les anglosaxons ont souvent l'écriture inverse. Le lecteur devra s'y retrouver.

Après développement,

$$T_{d(s)} = (1+ A_n .s + B_n\, s^2) / (1 + A_d.s + B_d .s^2 + C_d.\, s^3 + D_d\, s^4) \qquad \textbf{(BR-55)}$$

Expression dans laquelle,

$A_n = 1/\ \alpha\, Q_b$,et (BR-56)

$B_n = 1/\alpha^2$, (BR-57)

sont les coefficients du numérateur.

$A_d = (1/Q_t) + A_n(k_v + 1)$ (BR-58)

$B_d = 1 + (A_n /Q_t) + B_n (k_v + 1)$ (BR-59)

$C_d = A_n + (B_n/Q_t)$ (BR-60)

$D_d = B_n$, (BR-61)

les coefficients du dénominateur.

k_v et α sont déterminés lors de l'optimisation de l'enceinte

De même,

$$T_{et(p)} = 1 /(1+ \mathbf{p}.\tau_{et}) = 1 /(1+ \mathbf{p}/\omega_{et}) = 1 /(1+ \mathbf{p}.\omega_s/\omega_{et}.\omega_s) = 1 /(1+(k_{et}.\, p /\omega_s)) \qquad \text{(BR-62)}$$

Avec $k_{et} = \omega_s/\omega_{et} = f_s/f_{et}$ (BR-63)

qui permettent d'écrire $T_{et}(s) = 1 /(1+ \mathbf{s}.k_{et})$ (BR-64)

- **Déplacement dans l'évent**

BR-5 permet d'exprimer la relation existant entre X_d et X_v.
Après une première transformation

$$X_v (\mathbf{p}^2.M_{mv}.C_{mb} + \mathbf{p}.R_{mv}.C_{mb} + k_s^2) = -k_s.X_d \qquad \text{(BR-65)}$$

$$X_v = - X_d\ /\ ks(\mathbf{p}^2.M_{mv}.C_{mb}/k_s^2 + p.R_{mv}.C_{mb}/k_s^2 + 1) \text{ et} \qquad \text{(BR-66)}$$

$$X_v = -(X_d /k_s) \left[1/(p^2/\omega_b^2 + p/Q_b.\omega_b + 1) \right] \qquad \text{(BR-67)}$$

Soit

$$X_v = -(X_d\ /\ k_s) .\ T_{v(s)} \qquad \text{(BR-68)}$$

En utilisant la relation BR-53 et la transformée BR-54, le développement de $T_{v(p)}$ est immédiat et emploi les coefficients de $T_{d(s)}$.

$$T_{v(s)} = 1/ (1 + A_n.\mathbf{s} + B_n .\mathbf{s}^2) \qquad \text{(BR-69)}$$

C'est la fonction de transfert d'un filtre passe bas du second ordre dont la fréquence caractéristique correspond à la fréquence d'accord de la boite soit $f_b = \omega_b/2.\Pi$

- ***Remarque***

Par construction Q_b le coefficient de surtension de la boite est difficile à contrôler. Il est statistiquement voisin de 7 dans les réalisations usuelles. C'est du reste cette valeur qui est préconisée par KEELE et SNYDER.

Dans la pratique , S_v, la surface de l'évent est généralement inférieure à S_d,
le rapport $k_s=S_v/S_d$ (BR-5) est donc inférieur à 1.
En deçà de f_b, le déplacement instantané des molécules d'air dans l'évent , inversement proportionnel à k_s, est donc supérieur à celui du diaphragme. A la fréquence d'accord f_b il est encore multiplié par le coefficient de boite Q_b.

- ***Exemple*** : Imaginons un haut parleur de 30 cm de diamètre radiant, D_d , inclus dans une enceinte B.R. Le diamètre D_v interne de l'évent cylindrique est de 10 cm et son Qb=7.

Les surfaces rayonnantes
Du HP, $S_d = \Pi.D_d^2/4$,
De l'évent, $Sv = \Pi.\ D_v^2 / 4$
Amènent à $k_s =(D_v / D_d)^2$ soit 1 / 9 dans notre exemple.
Ainsi aux fréquences bien inférieures à f_b les particules d'air de l'évent auront un déplacement 9 fois supérieure à celui du diaphragme.
A la fréquence d'accord le rapport des déplacements atteindra 63.
Il en va évidemment de même pour les vitesses de déplacement.
Les fortes amplitudes de modulation, entraînent des non linéarités, autrement dit des distorsions.
Notre modéle emploie des équations linéaires qui ne traitent pas ces régimes.
Le choix du diamètre de l'évent est à faire avec le plus grand soin. Ce n'est pas par hasard si les enceintes JENSEN , dont le principe a été repris par ONKEN, ont une surface d'évent proche (environ 75%) de la surface du HP.

- Flux d'accélération

L'évaluation des déplacements du diaphragme et de l'air de l'évent nous mène tout naturellement vers le calcul du flux d'accélération $\Phi = p^2\ (S_d .X_d + S_v.X_v)$ (BR-70)
C'est lui qui engendre la pression aux molécules d'air. Il définit donc la réponse du système HP + enceinte.

La relation BR-52 nous donne $X_d=\left(B.l.U.\ C_{ms}/R_{et} \right).T_{et(s)}.\ T_{d(s)}$

Et BR-68 , $X_v= -\left(X_d\ /\ k_s \right).T_{v(s)}$

$(S_d .X_d + S_v.X_v) = \left(B.l.U.\ C_{ms}/R_{et} \right) T_{et(s)}.\ T_{d(s)}.\ S_d .(1 - T_{v(s)})$ (BR-71)

En multipliant $B.l.U.C_{ms}.S_d/R_{et}$ par M_{ms}/M_{ms} L'expression devient :
$B.l.U.C_{ms}.\ M_{ms}.S_d/R_{et}.M_{ms}$. Or, $C_{ms}.\ M_{ms}= 1/\omega_s^2$ et par voie de conséquence
$B.l.U.\ C_{ms}\ .\ S_d/R_{et} = B.l.U.\ \ Sd/(M_{ms}.\ \omega_s^2.R_{et})$
L' efficacité intrinsèque, du HP et de son générateur, $E= B.l.S_d/R_{et}.\ M_{ms}$ apparaît. **(BR-72)**

Le flux d'accélération devient:

$\Phi = \left(E.U\ .p^2\ /\omega_s^2\right).T_{et(s)}.\ \ T_{d(s)}.\left(1 - T_{v(s)} \right)$ soit $\Phi = E\ .\ U\ s^2.T_{et(s)}.T_{d(s)}.\left(1 - T_{v(s)} \right)$ (BR-73)

Si l'on convient que $T_{\Phi(s)}= s^2.T_{d(s)}.(1 - T_{v(s)})$ (BR-74)
après développement :

$$T_{\Phi(s)} = (A_n\ .s^3 + B_n\ s^4\ )\Big/\Big(1 + A_d.s + B_d\ .s^2 + C_d.\ s^3 + D_d\ s^4\ \Big) \qquad \text{(BR-75)}$$

et ainsi le flux d'accélération

$$\Phi= U.\ E.T_{et(s)}.\ T_{\Phi(s)} \qquad \text{(BR-76)}$$

Ainsi le flux d'accélération

$\Phi=U.\ E.T_{et(s)}.(A_n\ .s^3 + B_n\ s^4\ )\Big/\Big(1 + A_d.s + B_d\ .s^2 + C_d.\ s^3 + D_d\ s^4\ \Big)$ **(BR-77)**

Qui correspond à la réponse de l'enceinte.
Alors que certains s'attendaient à lire :

$$\Phi=U.\ E..B_n\ s^4\ \Big/\Big(1 + A_d.s + B_d\ .s^2 + C_d.\ s^3 + D_d\ s^4\ \Big) \qquad \text{(BR-78)}$$

expression fréquente dans une presse minimaliste qui du reste ne vous parlera jamais de flux d'accélération.
L'usage quasi généralisé de l'informatique ne doit pas faire reculer le concepteur qui préfèrera l'équation BR-77, d'autant qu'en factorisant le produit $B_n.\ s^4$, elle prend la forme

$$\Phi = U.\ E.T_{et(s)}.\left(B_n\, s^4 / (1 + A_d.s + B_d\, .s^2 + C_d.\ s^3 + D_d\, s^4) \right) \left[1 + \left(A_n / B_n\, .s \right) \right] \qquad \text{(BR-79)}$$

Si $T_{r(s)} = \left(B_n\, s^4 / (1 + A_d.s + B_d\, .s^2 + C_d.\ s^3 + D_d\, s^4) \right)$ est la fonction de transfert (BR-80)
prise en compte, une fonction de correction

$$T_{c(s)} = 1 + \left(A_n / B_n\, .s \right) \text{ est applicable} \qquad \text{(BR-81)}$$

En convenant que $C_c = A_n/B_n = \alpha / Q_b = f_b/(f_s.Q_b)$, (BR-82)

$$T_{c(s)} = 1 + \left(C_c / s \right) \qquad \text{(BR-83)}$$

Son action se limite aux fréquences inférieures à f_b. Par contre la présence de la foncction de transfert $T_{et(s)}$. montre l'affaiblitssement de la courbe de réponse à partir de f_{et}

Dans ce contexte ,en toute rigueur nous pouvons écrire $\Phi = U.\ E.T_{et(s)}.T_{r(s)}\, .T_{c(s)}$ (BR-84)
Et l'expression de la pression acoustique

$$\mathcal{P}_{(s)} = \mathcal{P}_0.\ T_{et(s)}.T_{r(s)}\, .T_{c(s)} \qquad \textbf{(BR-85)}$$

Avec $$\mathcal{P}_0 = U.\ E.\ \rho / 4.\pi \qquad \textbf{(BR-86)}$$

- **Modules et arguments**

Le calcul point par point de la courbe de réponse nécessite la mise en forme des trois fonctions de transfert $T_{et(s)}$, $T_{r(s)}$ et $T_{c(s)}$

$s = p.\tau_s = p/\omega_s$, s'écrivent en régime sinusoïdal établi $j.\omega/\omega_s = j.f/fs$ (BR-87)

Nous appellerons, le rapport, $^{f}/_{fs} = X$ (BR-88)

qu'il ne faut pas confondre avec le déplacement.
Ce qui nous amène à extraire le module des précédentes fonctions de transfert en fonction de X .

$$T_{et(x)} = 1/\ (1 + j.k_{er}.X) \qquad \text{(BR-89)}$$

$\mathcal{R}_{et(x)}=1$ représente la partie $\mathcal{R}$éelle et $\mathcal{I}_{et(x)}=k_{er}.X$ la partie $\mathcal{I}$maginaire de $T_{et(x)}$

Son module $|T_{et(x)}| = (\mathcal{R}_{et(x)}{}^2 + \mathcal{I}_{et(x)}{}^2)^{-1/2} = (1 + \mathcal{I}_{et(x)}{}^2)^{-1/2}$ (BR_90)
(attention à l'exposant négatif)

$$T_{r(jx)} = B_n\, X^4 / (1 - B_d\, .X^2 + D_d\, X^4 + j(A_d.X - C_d.\ X^3)) = B_n\, X^4 / (\mathcal{R}dr + j\, \mathcal{I}dr) \qquad \text{(BR-91)}$$

Ou $\mathcal{R}_{dr(x)}$ représente la partie $\mathcal{R}$éelle et $\mathcal{I}_{dr(x)}$ la partie $\mathcal{I}$maginaire, de l'expression complexe du dénominateur de $T_{r(s)}$

$$\mathcal{R}_{dr(x)} = 1 - B_d\, .X^2 + D_d\, X^4 \qquad \text{(BR-92)}$$

$$\mathcal{I}_{dr(x)} = A_d.X - C_d.\ X^3 \qquad \text{(BR-93)}$$

Son numérateur est $\mathcal{R}$éel

Le module de $T_{r(jx)}$ est $|T_{r(x)}| = B_n\, X^4\, .(\mathcal{R}_{dr(x)}{}^2 + \mathcal{I}_{dr(x)}{}^2)^{-1/2}$ (BR-94)

La traduction de $T_{c(s)}$ en $T_{c(jx)}$ complexe s'effectue de la même manière.

$$T_{c(jx)} = 1 + \left(C_c / j\, .X \right) = 1 - j.\ C_c / X = 1 - j\, \mathcal{I}_{nc(x)} \qquad \text{(BR-95)}$$

$$\mathcal{I}_{nc(x)} = C_c / X \qquad \text{(BR-96)}$$

Le module de $T_{c(jx)}$ soit $|T_{c(x)}| = (1 + \mathcal{I}_{nc(x)}{}^2)^{1/2}$ (BR-97)

Le module du flux d'accélération s'écrit

$|\Phi| = U \,.\, \mathrm{E} \,.\, |T_{et(x)}| \,.\, |T_{r(x)}| \,.\, |T_{c(x)}|$ (BR-98)

Le module de la pression acoustique délivrée par l'enceinte

$| \mathscr{P} | = \mathscr{P}_0 \,.\, |T_{et(x)}| \,.\, |T_{r(x)}| \,.\, |T_{c(x)}|$ **(BR-99)**