

De la puce à l'oreille

- Jean-Claude BODOT -

- L'Enceinte Close -

1- Références

Les développements qui suivent font, référence aux 3 carnets suivants :

- Eléments d'acoustique , (EA-x)
- Le HP électrodynamique - introduction, (HP-x)
- Le HP électrodynamique - Analyse, (HPA-x).

(EA- x) , (HP- x) , (HPA- x) sont des repères de formules dans chacun des carnets considérés, et x le rang du repère du carnet concerné .

Exemple : (HP-192) renvoi à la formule 192 du carnet « Le HP électrodynamique - introduction »

Et permet d'extraire le facteur d'efficacité du HP seul en fonction de son facteur d'accélération.

L'ensemble des éléments développés dans ces 3 carnets va faciliter la compréhension de l'enceinte close.

2- Introduction

Dans sa forme la plus élémentaire, elle est constituée d'un haut parleur et d'une boîte étanche dont les parois sont considérées infiniment rigides.

Elle a pour rôle principal d'isoler le rayonnement avant de la membrane du HP au détriment du rayonnement arrière.

Son schéma de principe est le suivant :

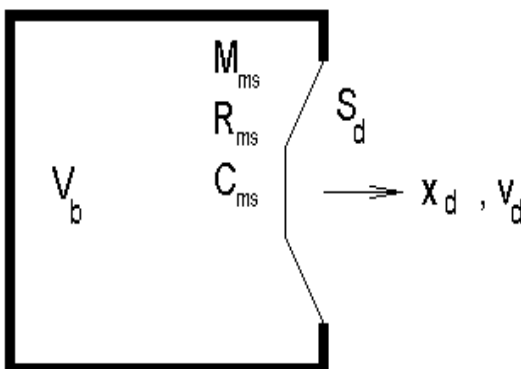


fig:1

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.

Les parois de l'enceinte ne peuvent ni, rentrer en vibration, ni communiquer vers l'extérieur les variations de pressions internes.

Dans ce seul cas la variation du volume d'air pris en compte à chaque instant est :

$$\Delta V_b = S_d \cdot x_d \quad (\text{EC-1})$$

La transformation est adiabatique et réversible. Elle est régie par l'équation de Laplace et permet d'écrire :

$$\Delta P = - \gamma \cdot P_o \Delta V_b / V_b \quad (\text{EC-2})$$

Le chapitre « Eléments d'acoustique » nous indique que $\gamma \cdot P_o = \rho \cdot c^2$, avec, ρ la masse volumique de l'air à la température considérée et c la célérité du son à cette même température.

Qui permet de déduire $C_{ab} = V_b / \rho \cdot c^2$ (EC-3)
la compliance acoustique de la boîte.

♦ Influence sur le HP

- Le volume de l'enceinte charge la face arrière du HP par une impédance acoustique Z_{ab} liée à la présence de C_{ab} .
- La face arrière de la membrane n'est plus en champ libre et son impédance de rayonnement interne est différente de celle du rayonnement externe. Soumise au flux de vitesse du HP elle est en série avec Z_{ab} .

♦ Rayonnement externe à l'enceinte

Elle est caractérisée par l'impédance de rayonnement à l'air libre d'une face de la membrane du HP. Cette face de la membrane sera appelée face avant. Elle est identique à celle qui a été définie dans le chapitre « Le HP électrodynamique - introduction ». Afin de la distinguer nous l'appellerons Z_{arF}

♦ Rayonnement interne à l'enceinte

L'autre face du HP rayonne vers l'intérieur de l'enceinte. L'impédance de rayonnement de cette face de la membrane sera notée Z_{arR} . Elle est directement liée aux cotes internes de l'enceinte.

Cette face de la membrane sera appelée face arrière.

Appelons S_b , la surface interne de la face avant, et d_b la profondeur de l'enceinte.

Convenons que le rapport $S_d/S_b = \alpha$ (EC-4)

S_d restant la surface radiante du diaphragme du HP, et r_d son rayon.

Par construction la surface interne de l'enceinte S_b est supérieure à la surface radiante du HP. Ainsi, le coefficient α est inférieur ou au plus égal à 1.

L'impédance de rayonnement acoustique de la face arrière de la membrane est constituée d'une masse acoustique,

$$M_{arR} = \rho \cdot (8 \cdot r_d \cdot (1 - \alpha) / 3 \cdot \pi \cdot S_d) + (d_b \cdot \alpha^2 / 3 \cdot S_d) \tag{EC-5}$$

qu'il est commode de formuler $M_{arR} = \beta \cdot \rho / \pi \cdot r_d$ (EC-6)

Dans cette formule, $\rho / \pi \cdot r_d = \rho \cdot r_d / S_d$ est homogène à une masse acoustique. C'est la masse acoustique caractéristique du HP.

$$M_{ar0} = \rho \cdot r_d / S_d \tag{EC-7}$$

et, $\beta = [(d_b \cdot \alpha^2 / r_d) + (8 \cdot (1 - \alpha) / \pi)] / 3$ (EC-8)

le facteur des masses de rayonnement interne. En se souvenant que la masse acoustique de rayonnement externe

$$M_{arF} = 8 \cdot \rho \cdot r_d / 3 \cdot \pi \cdot S_d = 8 \cdot M_{ar0} / 3 \cdot \pi \tag{EC-9}$$

On peut écrire $M_{arR} = M_{ab1} + M_{ab2}$, dans laquelle : (EC-10)

$$M_{ab1} = M_{arF} \cdot (1 - \alpha), \text{ et} \tag{EC-11}$$

$$M_{ab2} = \rho \cdot d_b \cdot \alpha^2 / 3 \cdot S_d. \tag{EC-12}$$

M_{ab1} est donc inférieure à M_{arF} . L'impédance interne de rayonnement s'écrit: $Z_{arR} = j \cdot \omega \cdot M_{ab} = \mathbf{p} \cdot M_{ab}$ (EC-13)

♦ Schémas équivalents

Le circuit équivalent, du HP chargé par une enceinte close, peut être représentée par le schéma suivant.

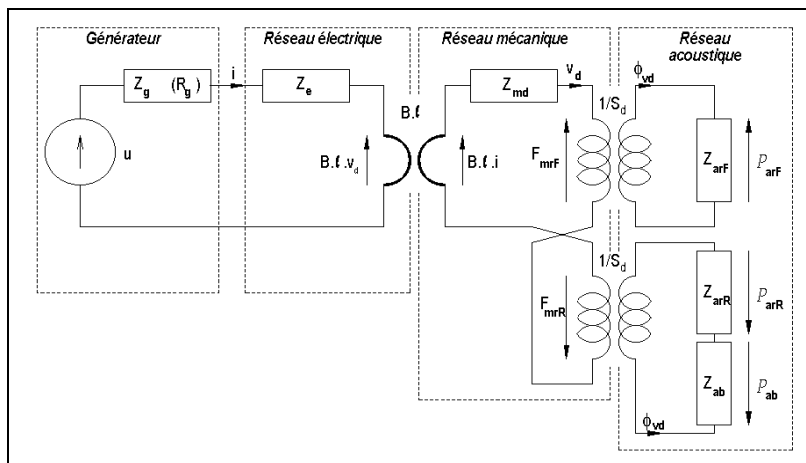


fig:2

Les composants des réseaux électriques et mécaniques ainsi que les éléments de couplage sont ceux du HP isolé. Déjà mentionné, l'impédance de rayonnement externe Z_{arF} est inchangée. On en déduit le circuit acoustique suivant :

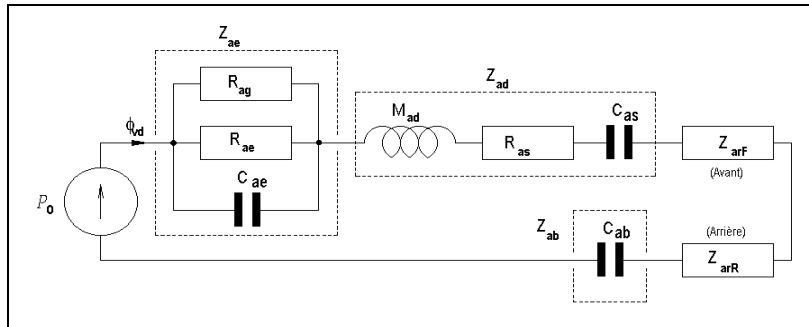


fig:3

Ainsi que le circuit mécanique

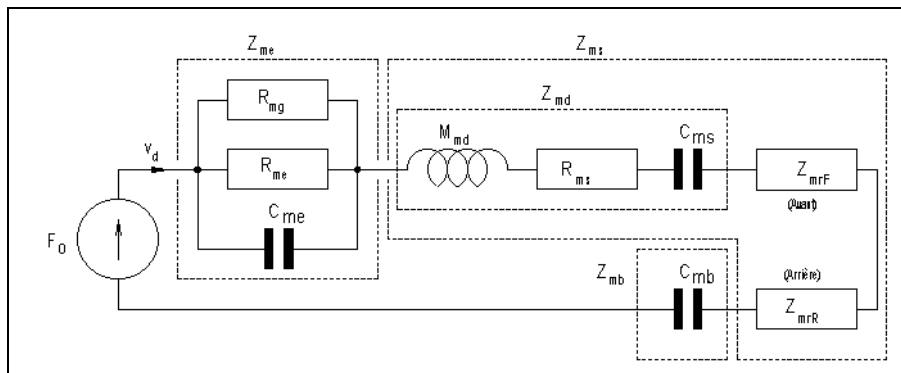


fig:4

Avec :

- l'équivalent mécanique de la compliance de boîte. $C_{mb} = C_{ab}/S_d^2$ (EC-14)

- l'impédance mécanique de rayonnement interne $Z_{mrR} = Z_{arR} \cdot S_d^2$ (EC-15)

Dont on déduit la masse mécanique du rayonnement interne :

$$M_{mrR} = M_{arR} \cdot S_d^2 = \beta \cdot \rho_o \cdot S_d^2 / \pi \cdot r_d = \beta \cdot M_{arO} \cdot S_d^2 \quad (EC-16)$$

Le produit $M_{arO} \cdot S_d^2$ est homogène à une masse mécanique et ainsi

$$M_{mrR} = \beta \cdot M_{mrO} = \beta \cdot \rho_o \cdot S_d \cdot r_d \quad (EC-17)$$

Dans laquelle apparaît, la masse de rayonnement mécanique caractéristique du HP,

$$M_{mrO} = \rho_o \cdot S_d \cdot r_d \quad (EC-18)$$

C'est la masse d'air contenue dans un cylindre, de surface de base S_d et de hauteur r_d .

La masse mécanique de rayonnement interne de la membrane du HP, M_{mrR} , est donc le produit de la masse de rayonnement mécanique caractéristique du HP, M_{mrO} , par le facteur de masses de rayonnement interne β de l'enceinte (EC-17)

♦ - Optimisation de la masse acoustique de rayonnement interne

En observant le circuit mécanique équivalent au HP dans son enceinte close il apparaît clairement que M_{mrR} est en série avec M_{md} . Il en est de même dans le circuit acoustique avec M_{arR} en série avec M_{ad} .

Il n'en est pas de même pour M_{arF} (donc M_{mrF}) purement inductive qu'aux fréquences bien inférieures à la fréquence de coupure acoustique du HP. A ces seules fréquences, M_{arF} et M_{mrF} se placent en série avec les deux masses précédentes, dans chacun des circuits concernés.

✓ - 1° cas , Minimisation

Le rendement du système dépend directement des masses mises en jeu par le système.

Autrement dit diminuer M_{mrR} revient à augmenter l'efficacité du couple HP + enceinte.

Diminuer M_{mrR} revient à diminuer β .

La nullité de la dérivée $d\beta/d\alpha = (2.\alpha.d_b/3.r_d) - (8/3.\pi)$ (EC-19)

Nous permet de déterminer que β est minimum lorsque $\alpha_{opt1} = 4.r_d/\pi.d_b$ (EC-20)

A cette condition $\beta_{min} = (8/\pi) . [1 - (4. r_d/3.\pi.d_b)]$. (EC-21)

Remarques:

- Il est utile de vérifier que la profondeur calculée de l'enceinte, $d_b = 4.r_d/\pi. \alpha_{opt1}$, (EC-22)
est supérieure à la cote de profondeur du HP placé dans la boite.
- Le volume réel interne V_{rb} à l'enceinte est constitué par la somme de 3 volumes élémentaires.
 - Le volume V_b calculé,
 - Le volume V_{HP} occupé par le HP. Il comprend les volumes de l'aimant, du saladier, du tronc de cône de la membrane,...etc.
 - Le volume V_{rft} occupé par les renforts de l'enceinte. Ces derniers étant destinés à la parfaite rigidité des parois et à l'étanchéité des assemblages.

Le volume réel de l'enceinte est donc : $V_{rb} = V_b + V_{HP} + V_{rft}$ (EC-23)

- La précédente remarque : $d_b = V_{rb}/S_b$ (EC-24)

permet de définir α_{opt1} à partir du volume interne réel de l'enceinte

$$V_{rb}/S_b = 4.r_d/\pi. \alpha_{opt1} \Leftrightarrow \alpha_{opt1} = 2 [r_d^3/V_{rb}]^{1/2} \quad (EC-25)$$

✓ - **2° cas**, $M_{arR} = M_{arF}$

Aux fréquences inférieures à la fréquence de coupure acoustique du HP les masses dynamiques de rayonnement internes et externes sont identiques, $M_{arR} = M_{arF}$. (EC-26)

Développons, $M_{ab1} + M_{ab2} = M_{arF}$ (EC-27)

$$M_{arF}(1 - \alpha_{opt2}) + M_{ab2} - M_{arF} = 0, \quad (EC-28)$$

$$M_{arR} . \alpha_{opt2} = M_{ab2}, \quad (EC-29)$$

Pour arriver à $\alpha_{opt2} = 8 r_d/\pi.d_b$ (EC-30)

En tenant compte des remarques précédentes, la traduction de α_{opt2} en fonction du volume réel V_{rb} de boite,

$$\alpha_{opt2} = 8.r_d.S_b/\pi.V_{br} = 8.r_d.S_b.S_d / S_d.\pi.V_{rb} \quad (EC-31)$$

$$\alpha_{opt2}^2 = 8.r_d.S_d/\pi.V_{rb} \quad (EC-32)$$

Soit $\alpha_{opt2} = 2 [2.r_d^3/V_{rb}]^{1/2}$ (EC-33)

Remarque : $\alpha_{opt2} = \alpha_{opt1} . \sqrt{2} = 1,414. \alpha_{opt1}$ (EC-34)

Exemple : Un haut parleur de $d_{max} = 25\text{cm}$ de diamètre, de rayon radiant $r_d = 10\text{cm}$ (1dm) et dont le volume réel de boite $V_{rb} = 20\text{dm}^3$ a :

un $\alpha_{opt1} = 2 . (1/20)^{1/2} = 0,447$

un $\alpha_{opt2} = 2 . (2/20)^{1/2} = 0,632$

La surface rayonnante du HP, $S_d = \pi. r_d^2 = 3,14159 \text{ dm}^2$

La surface interne de la boite supportant le HP (La face interne avant de l'enceinte) $S_b = S_d/\alpha_{opt}$ soit :

$S_{b1} = 3,14159/0,447 = 7,028 \text{ dm}^2$ pour la minimisation de M_{arR}

$S_{b2} = 3,14159/0,632 = 4,998 \text{ dm}^2$ soit 5dm^2 pour l'optimisation ou $M_{arR} = M_{arF}$

La surface de montage du HP est de $\pi.d_{max}^2/4 = 4,9\text{dm}^2$. Elle est très proche de S_{b2} .

Sa profondeur interne :

$d_{b1} = V_{rb}/S_{b1} = 20/7,02 = 2,84\text{dm}$ soit $d_{b1} = 284\text{mm}$.

$d_{b2} = V_{rb}/S_{b2} = 20/5 = 4\text{dm}$ soit $d_{b1} = 400\text{mm}$.

◆ Mouvements de la membrane

◆◆ - Déplacement

L'équation fondamentale de la dynamique appliquée à la membrane du haut parleur et exprimée à travers l'opérateur $p = d/dt = j.\omega$ est :

$$p^2 \cdot M_{msb} \cdot x_d + p \cdot R_{ms} \cdot x_d + x_d / C_{ms} + (\rho c^2 S_d^2 x_d / V_b) = B \cdot I \cdot i \quad (EC-35)$$

La fonction de transfert de la masse de rayonnement externe, étant momentanément omise.
(cf. Le HP électrodynamique - introduction)

$$M_{msb} = M_{md} + M_{mrF} + M_{mrR}$$

Remarque : $M_{msb} = M_{md} + 2 \cdot M_{mrF}$ dans le cas où l'optimisation de l'enceinte amène à poser $M_{mrR} = M_{mrF}$.

Dans ce cas $M_{msb} = M_{ms}$, l'ensemble des masses mises en mouvement par le HP seul.

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

$$(EC-35) \text{ devient : } p^2 \cdot M_{msb} \cdot x_d + p \cdot R_{ms} \cdot x_d + x_d / C_{ms} + x_d (S_d^2 / C_{ab}) = B \cdot I \cdot i \quad (EC-36)$$

$$\text{d'après (EC-3)} \quad S_d^2 / C_{ab} = 1 / C_{mb} \quad (EC-37)$$

$$\text{et ainsi} \quad p^2 \cdot M_{msb} \cdot x_d + p \cdot R_{ms} \cdot x_d + x_d / C_{ms} + x_d / C_{mb} = B \cdot I \cdot i \quad (EC-38)$$

$$\text{Dans laquelle nous pouvons identifier la force de réaction de la boîte } F_b = x_d / C_{mb} \quad (EC-39)$$

L'intégration de l'impédance de rayonnement $Z_{mrF} = M_{mrF} \cdot T_{Mmr(p)}$, dans (EC-38), permet d'écrire l'équation complète du déplacement de l'équipage mobile du HP, placé dans une enceinte close.

$$p^2 \cdot (M_{md} + M_{mrR} + M_{mrF} \cdot T_{Mmr(p)}) \cdot x_d + p \cdot R_{ms} \cdot x_d + x_d / C_{ms} + x_d / C_{mb} = B \cdot I \cdot i \quad (EC-40)$$

Comme pour le HP isolé l'ensemble est alimenté, par un amplificateur délivrant une tension instantanée u et ayant une impédance de sortie, identifiée à une résistance pure R_g .

R_e est la résistance électrique de la bobine mobile, L_e son inductance.

L'intensité instantanée, du courant circulant dans la bobine mobile est

$$i = [(u/R_{et}) - (p \cdot B \cdot I \cdot x_d / R_{et})] \cdot T_{et(p)} \quad (EC-41)$$

On y constate la présence de la fonction de transfert électrique initiale du HP.

En associant (EC-40) à (EC-41) et après mise en facteur de x_d

$$B \cdot I \cdot (u/R_{et}) \cdot T_{et(p)} = x_d \cdot [p^2 \cdot (M_{md} + M_{mrR} + M_{mrF} \cdot T_{Mmr(p)}) + p \cdot R_{ms} + p \cdot B^2 \cdot I^2 \cdot T_{et(p)} / R_{et} + 1/C_{ms} + 1/C_{mb}] \quad (EC-42)$$

◆◆ Impédances ramenées dans le réseau mécanique du système

Sachant que la vitesse $v_d = p \cdot x_d$, on tire $x_d = v_d / p$ qui, reporté dans (EC-42), fait écrire

$$B \cdot I \cdot (u/R_{et}) \cdot T_{et(p)} = v_d \cdot [p \cdot (M_{md} + M_{mrR} + M_{mrF} \cdot T_{Mmr(p)}) + R_{ms} + B^2 \cdot I^2 \cdot T_{et(p)} / R_{et} + 1/p \cdot C_{ms} + 1/p \cdot C_{mb}] \quad (EC-43)$$

$$\text{En appelant} \quad Z_{mb} = 1/p \cdot C_{mb} \quad (EC-44)$$

et, en se souvenant qu'une impédance mécanique est égale au rapport d'une force sur une vitesse,

$$\text{la force} \quad F_{O(p)} = B \cdot I \cdot (u/R_{et}) \cdot T_{et(p)} \quad (EC-45)$$

appliquée au circuit mécanique, peut s'écrire :

$$F_{O(p)} = v_d (Z_{md} + Z_{mrF} + Z_{mrR} + Z_{me} + Z_{mb}) \quad (EC-46)$$

L'impédance mécanique totale du HP placé dans une enceinte close.

$$F_{O(p)} / v_d = Z_{mtb} = Z_{md} + Z_{mrF} + Z_{mrR} + Z_{me} + Z_{mb} \quad (EC-47)$$

Rapprochée de l'impédance mécanique du HP seul (HP-127)

$$Z_{mtb} = Z_{mt} + Z_{mrF} + Z_{mrR} + Z_{mb} \quad (EC-48)$$

L'impédance mécanique du couple HP + enceinte close est donc la somme des impédances mécaniques du HP et de sa boîte.

◆◆ Equations simplifiées du mouvement

C'est elle qui va permettre de définir les paramètres principaux de l'ensemble HP+ enceinte.

En considérant $T_{et(p)} = 1$ et $T_{mnr(p)} = 1$.

Définie à partir de (EC-38) l'équation simplifiée du système est:

$$B \cdot I \cdot u / R_{et} = x'_{d(p)} [p^2 \cdot M_{msb} + p \cdot R_{mt} + 1/C_{ms} + 1/C_{mb}] \quad (EC-49)$$

et dans laquelle on reconnaît :

$$M_{msb} = M_{md} + M_{mrF} + M_{mrR} \quad (EC-50)$$

Si l'optimisation des dimensions de l'enceinte est telle que

$$M_{mrR} = M_{mrF} \Leftrightarrow M_{msb} = M_{md} + 2 \cdot M_{mrF} = M_{ms} \quad (EC-51)$$

$$R_{mt} = R_{met} + R_{ms} \quad (EC-52)$$

C'est (EC-49) qui va permettre de définir les paramètres pratiques de l'ensemble HP+ enceinte.

En fait, dans la mesure ou la résistance interne du générateur est prise en compte à travers R_{et} et son image mécanique R_{met} , c'est l'ensemble HP, enceinte et amplificateur qui est analysé.

♦♦ Déplacement simplifié et paramètres de couplage du HP à l'enceinte close

C'est l'hypothèse $M_{mrR} = M_{mrF}$ qui est retenue . Et ainsi $M_{msb} = M_{ms}$ (EC-53)

Depuis (EC-38) la liaison série des deux compliances C_{ms} et C_{mb} est apparente.

En posant $C_{mb} = C_{ms} / \alpha$, (EC-54)

(EC-49) devient : B.l. $u/R_{et} = x'_{d(p)} \left[p^2 \cdot M_{ms} + p \cdot R_{mt} + (1+\alpha)/C_{ms} \right]$ (EC-55)

ou encore B.l. $u/R_{et} = x'_{d(p)} \left[p^2 \cdot M_{ms} \cdot C_{ms} + p \cdot C_{ms} \cdot R_{mt} + (1+\alpha) \right] / C_{ms}$ (EC-56)

Que l'on peut , conformément au chapitre d'introduction du HP , écrire

$$B.l. u/R_{et} = x'_{d(p)} \left[p^2 / \omega_s^2 + p / \omega_s \cdot Q_t + (1+\alpha) \right] / C_{ms} \quad (EC-57)$$

Appelons $k_{bc}^2 = (1+\alpha)$ (EC-58)

et ainsi u. B.l. $C_{ms} / R_{et} = x'_{d(p)} \cdot k_{bc}^2 \left[(p^2 / k_{bc}^2 \cdot \omega_s^2) + (p / k_{bc}^2 \cdot \omega_s \cdot Q_t) + 1 \right]$ (EC-59)

ou encore en multipliant haut et bas le premier terme par M_{ms} , en multipliant les deux termes par S_d et en interprétant

$$u. B.l. S_d / R_{et} \cdot M_{ms} = x'_{d(p)} \cdot \omega_b^2 \cdot S_d \cdot \left[(p^2 / \omega_b^2) + (p / \omega_b \cdot Q_b) + 1 \right] \quad (EC-60)$$

La présence du facteur d'efficacité $E' = (B.l. S_d / M_{ms} \cdot R_{et})$, développé dans (HP-191), apparaît.

Et le déplacement de l'équipage mobile devient.

$$x'_{d(p)} = u \cdot E' \cdot T'_{bcx(p)} / \omega_b^2 \cdot S_d \quad (EC-61)$$

avec $T'_{bcx(p)} = 1 / (p^2 / \omega_b^2 + p / \omega_b \cdot Q_b + 1)$ (EC-62)

la fonction de transfert simplifiée du HP dans son enceinte close.

C'est la transmittance d'un filtre passe bas du second ordre.

En identifiant les termes de (EC-60) par rapport à (EC-59)

- La pulsation d'accord du couple HP+enceinte est telle que :

$$\omega_b^2 = \omega_s^2 \cdot k_{bc}^2 \quad (EC-63)$$

soit $\omega_b = \omega_s \cdot k_{bc}$ (EC-64)

- Le coefficient de qualité de l'enceinte, couplée au HP, est tel que

$$Q_b \cdot \omega_b = k_{bc}^2 \cdot \omega_s \cdot Q_t = k_{bc} \cdot \omega_b \cdot Q_t \quad (EC-65)$$

soit $Q_b = Q_t \cdot k_{bc}$ (EC-66)

Remarques :

– La compliance acoustique de l'enceinte est donnée en (EC-3) et son report dans le circuit mécanique en (EC-37) . La relation entre la compliance mécanique de la boite et son volume peut donc être exprimée :

$$V_b = C_{mb} \cdot S_d^2 \cdot \rho \cdot c^2 \quad (EC-67)$$

Le volume équivalent à la suspension du HP est :

$$V_{as} = C_{ms} \cdot S_d^2 \cdot \rho \cdot c^2 \quad (EC-68)$$

En considérant (EC-50), le coefficient $\alpha = C_{ms} / C_{mb}$ peut être interprétée en fonction des deux précédents volumes . en effectuant le rapport (EC-68) / (EC-66) ,

$$a = V_{as}/V_b \quad (EC-69)$$

et pourquoi se priver

$$k_{bc} = (1+a)^{1/2} = [1 + (V_{as}/V_b)]^{1/2} \quad (EC-70)$$

L'équation simplifiée du mouvement est de la même forme que celle du HP seul (HP-245).

La mise en boîte du HP :

- déplace la fréquence $f_s = \omega_s/2.\pi$ de coupure du HP vers $f_b = \omega_b/2.\pi$.

- partir de (EC-64) qui peut être écrite $f_b = f_s \cdot k_{bc}$ (EC-71)

et (EC-70) qui montre que $k_{bc} > 1$, on déduit que $f_b > f_s$ (EC-72)

- Soumis à k_{bc} le coefficient de surtension total augmente et devient Q_b

En partant de (HP-206) on peut écrire :

$$1/Q_b = 1/k_{bc} \cdot Q_t = 1/k_{bc} [(1/Q_{ms}) + (1/Q_e)] = (1/k_{bc} \cdot Q_{ms}) + (1/k_{bc} \cdot Q_e) \quad (EC-73)$$

qu'il est possible de traduire

$$1/Q_b = (1/Q_{mb}) + (1/Q_{eb}) \quad (EC-74)$$

a condition de poser

$$Q_{mb} = k_{bc} \cdot Q_{ms} \quad (EC-75)$$

et

$$Q_{eb} = k_{bc} \cdot Q_e \quad (EC-76)$$

De ce point de vue, un HP chargé par une enceinte close, peut être considéré, comme un HP dont la suspension a été modifiée et qui ne rayonne que par sa face avant.

Cette dernière remarque est importante, car elle permet de dresser l'ensemble des équations du mouvement du HP dans son enceinte, en adaptant celles qui ont été développées pour le HP isolé.

□ Volume d'air brassé par le système

$$V'_{dbc(p)} = u \cdot E \cdot T'_{xbc(p)} \cdot 1/\omega_b^2 \quad (EC-77)$$

□ Vitesse de l'équipage mobile

$$v'_{dbc(p)} = u \cdot E \cdot T'_{vbc(p)} \cdot 1/(S_d \cdot \omega_b) \quad (EC-78)$$

avec

$$T'_{vbc(p)} = (p/\omega_b) T'_{xbc(p)} \quad (EC-79)$$

□ Flux de Vitesse de l'équipage mobile

$$\Phi'_{vbc(s)} = u \cdot E \cdot T'_{vbc(p)} \cdot 1/\omega_b \quad (EC-80)$$

□ Accélération de l'équipage mobile

$$\gamma'_{\gamma bc(p)} = u \cdot E \cdot T'_{\gamma bc(p)} / S_d \quad (EC-81)$$

dans laquelle

$$T'_{\gamma bc(p)} = (p^2/\omega_b^2) T'_{xbc(p)} \quad (EC-82)$$

□ Flux d'accélération simplifié de l'équipage mobile

$$\Phi'_{\gamma bc(p)} = u \cdot E \cdot T'_{\gamma bc(p)} \quad (EC-83)$$

◆ Equations réelles du mouvement

♦♦ Facteur d'accélération de la membrane

Le facteur d'accélération est défini par le rapport du facteur de force sur l'ensemble des masses mécaniques, du HP, en mouvement.

$$\text{Dans le cas de l'enceinte close } \Gamma_{ec} = B \cdot l \cdot S_d / (M_{md} + M_{mrF} + M_{mrR}) \quad (EC-84)$$

Il est identique au facteur d'accélération Γ du HP seul (HP-190), dans le cas où $M_{mrF} = M_{mrR}$

Le rapport entre les deux facteurs de d'accélération est :

$$\Gamma_{ec}/\Gamma = (M_{md} + 2M_{mrF}) / (M_{md} + M_{mrF} + M_{mrR}) \quad (EC-85)$$

Dans toutes les conditions il est très voisin ou égal à 1.

$$\Gamma_{ec} = \Gamma \text{ lorsque } M_{mrF} = M_{mrR} \quad (EC-86)$$

♦♦ Facteur d'efficacité du HP dans une enceinte close

Directement lié au facteur d'accélération

$$E_{ec} = \Gamma_{ec} \cdot (S_d / R_{et}) \quad (EC-87)$$

Comme le rapport des facteurs d'accélération, le rapport des facteurs d'efficacité est proche de 1.

Il est identique au facteur d'efficacité \bar{E} (HP-192) du HP seul, dans le cas où $M_{mrF} = M_{mrR}$

♦♦ Déplacement réel de l'équipage mobile

en tenant compte des paramètres décrits précédemment , et, après une première mise en forme (EC-42), s'écrit :

$$u. B.I. C_{ms} \cdot T_{et(p)} / R_{et} = x_d \cdot [p^2 \cdot C_{ms} (M_{md} + M_{mrR} + M_{mrF} \cdot T_{Mmr(p)}) + p \cdot C_{ms} \cdot R_{ms} + p \cdot R_{met} \cdot C_{ms} \cdot T_{et(p)} + (1+a)] \quad (EC-88)$$

En établissant les constantes $k_{Mec} = M_{mrF} / (M_{md} + M_{mrR})$ (EC-89)

Et $k_{Rm} = R_{met} / R_{ms}$ identique à (HP-167)

Le déplacement devient $x_{d(p)} = u \cdot T_{e(p)} \cdot E_{ec} \cdot T_{b(p)} / (S_d \cdot \omega_{sb}^2)$ (EC-90)

Dans laquelle $\omega_{sb}^2 = 1 / (M_{md} + M_{mrR}) \cdot C_{ms}$ (EC-91)

et $T_{b(p)} = 1 / [p^2 (M_{md} + M_{mrR}) \cdot C_{ms} (1 + k_{Mec} \cdot T_{Mmr(p)}) + p \cdot C_{ms} \cdot R_{ms} (1 + k_{Rm} \cdot T_{e(p)}) + k_{bc}^2]$ (EC-92)

Une fonction de transfert intermédiaire du déplacement de l'équipage mobile, Avant son développement (EC-92) peut prendre la forme :

$$T_{b(p)} = 1 / k_{bc}^2 \cdot [(p^2 \cdot (1 + k_{Mec} \cdot T_{Mmr(p)}) / k_{bc}^2 \cdot \omega_{sb}^2) + (p \cdot (1 + k_{Rm} \cdot T_{e(p)}) / k_{bc}^2 \cdot Q_{ms} \cdot \omega_{sb}) + 1] \quad (EC-93)$$

Le rapport $k_{fsb}^2 = (\omega_s / \omega_{sb})^2 = M_{md} + M_{mrR} / (M_{md} + 2 \cdot M_{mrF})$ (EC-94)

Permet d'écrire $\omega_{sb} = \omega_s / k_{fsb}$ (EC-95)

$$T_{b(p)} = 1 / [k_{bc}^2 \cdot [(p^2 \cdot (1 + k_{Mec} \cdot T_{Mmr(p)}) \cdot k_{fsb}^2 / k_{bc}^2 \cdot \omega_s^2) + (p \cdot (1 + k_{Rm} \cdot T_{e(p)}) \cdot k_{fsb} / k_{bc}^2 \cdot Q_{ms} \cdot \omega_s) + 1]] \quad (EC-96)$$

qui peut être modifiée, à l'aide de (EC-63) et (EC-75):

$$T_{b(p)} = 1 / [k_{bc}^2 \cdot [(p^2 \cdot (1 + k_{Mec} \cdot T_{Mmr(p)}) \cdot k_{fsb}^2 / \omega_b^2) + (p \cdot (1 + k_{Rm} \cdot T_{e(p)}) \cdot k_{fsb} / Q_{mb} \cdot \omega_b) + 1]] \quad (EC-97)$$

L'expression définitive du déplacement devient :

$$x_{d(p)} = u \cdot T_{e(p)} \cdot E_{ec} \cdot T_{x_{bc}(p)} / (S_d \cdot \omega_b^2) \quad (EC-98)$$

avec $T_{x_{bc}(p)} = 1 / [(p^2 \cdot (1 + k_{Mec} \cdot T_{Mmr(p)}) \cdot k_{fsb}^2 / \omega_b^2) + (p \cdot (1 + k_{Rm} \cdot T_{e(p)}) \cdot k_{fsb} / Q_{mb} \cdot \omega_b) + 1]$ (EC-99)

la fonction de transfert du déplacement réel du diaphragme dans son enceinte close.

De ce dernier couple de formules , nous pouvons extraire les autres éléments du mouvement.

□ Volume réel d'air brassé par le système

$$V_{dbc(p)} = u \cdot E_{ec} \cdot T_{et(p)} \cdot T_{x_{bc}(p)} \cdot 1 / \omega_b^2 \quad (EC-100)$$

□ Vitesse réelle de l'équipage mobile

$$v_{dbc(p)} = u \cdot E_{ec} \cdot T_{et(p)} \cdot T_{v_{bc}(p)} \cdot 1 / (S_d \cdot \omega_b) \quad (EC-101)$$

avec $T_{v_{bc}(p)} = (p / \omega_b) \cdot T_{x_{bc}(p)}$ (EC-102)

□ Flux de Vitesse réel de l'équipage mobile

$$\Phi_{v_{bc}(s)} = u \cdot E_{ec} \cdot T_{et(p)} \cdot T_{v_{bc}(p)} \cdot 1 / \omega_b \quad (EC-103)$$

□ Accélération réelle de l'équipage mobile

$$\gamma_{\gamma_{bc}(p)} = u \cdot E_{ec} \cdot T_{et(p)} \cdot T_{\gamma_{bc}(p)} / S_d \quad (EC-104)$$

dans laquelle $T_{\gamma_{bc}(p)} = (p^2 / \omega_b^2) \cdot T_{x_{bc}(p)}$ (EC-105)

□ Flux d'accélération réel de l'équipage mobile

$$\Phi_{\gamma_{bc}(p)} = u \cdot E_{ec} \cdot T_{et(p)} \cdot T_{\gamma_{bc}(p)} \quad (EC-106)$$

3 - Réponse de l'ensemble HP + enceinte close

♦ Pression acoustique délivrée

La force qu'exerce la membrane sur le milieu est le produit de l'accélération qu'elle provoque, par la masse du milieu. La pression P_{ar0} résultante est donc égale au flux d'accélération par la masse volumique ρ de ce même milieu

$$P_{ar0} = \rho \cdot \Phi_{\gamma_{bc}(p)} \quad (EC-107)$$

Tout comme le HP, les mesures sont effectuées à 1m de distance de l'enceinte acoustique et la pression exercée est ramenée à notre unité de surface.

Si l'enceinte concernée est de faibles dimensions, aux fréquences basses, elle est considérée rayonner comme une sphère. Elle rayonne donc dans un angle solide de $4 \cdot \pi$ stéradians. A la distance normalisée de 1m, la surface de la sphère est de $S = 4 \cdot \pi \text{ m}^2$

La pression acoustique recherchée est donc $P_{ar} = P_{ar0} / 4.\pi$ (EC-108)

soit $P_{ar} = \rho .u. E_{ec} . T_{et(p)} . T_{\gamma bc (p)} / 4.\pi$ (EC-109)

Qui montre que l'allure de la courbe de réponse dépend du produit des deux transmittances $T_{et(p)} . T_{\gamma bc (p)}$.

La tension u appliquée dépend de l'impédance normalisée du HP, $Z_{norm}=2,4,8,16...w$ et est conforme à la formule (HP-257) de « HP-intro » $u = (Z_{norm})^{1/2}$

La référence de pression $P_{a0} = 2. 10^{-5} Pa = 20 \mu Pa$, correspond à notre seuil d'audition à 1kHz

Sur le plan des magnitudes de Bode

$$N_{dB} = 20 \log (|P_{ar}| / P_{a0}) \quad (EC-110)$$

$$N_{dB} = 20 \log (\rho .u. E_{ec} . |T_{et}| . |T_{\gamma bc}| / 8.\pi . 10^{-5}) \quad (EC-111)$$

$$N_{dB} = 20.\log(\rho) + 20.\log(u) + 20.\log(E_{ec}) + 20.\log(10^5/8.\pi) + 20.\log(|T_{et}|) + 20.\log(|T_{\gamma bc}|) \quad (EC-112)$$

$$N_{dB} = 72 + N_{dB(\rho)} + N_{dB(u)} + N_{dB(E_{ec})} + N_{dB(T_{et})} + N_{dB(T_{\gamma bc})} \quad (EC-113)$$

dans laquelle

– $20.\log(10^5/8.\pi) = 72$ est une constante d'audition et de directivité. (EC-114)

– $N_{dB(\rho)} = 20.\log(\rho)$ est l'influence de l'état de l'air, (EC-115)

– $N_{dB(u)} = 20.\log(u)$ est l'influence de la tension aux bornes du HP, (EC-116)

– $N_{dB(E_{ec})} = 20.\log(E_{ec})$ est l'action du facteur d'efficacité du couple HP+Enceinte, (EC-117)

– $N_{dB(T_{et})} = 20.\log(|T_{et}|)$ est l'action du réseau électrique du HP (EC-118)

– $N_{dB(T_{\gamma bc})} = 20.\log(|T_{\gamma bc}|)$ est l'action de la transmittance d'accélération du système (EC-119)

Sur la courbe de réponse du HP.

♦ Caractéristiques de l'enceinte close

Pour les fréquences de coupure inférieures à la fréquence de coupure électrique c'est la transmittance $T_{\gamma bc (p)}$ qui détermine la courbe de réponse du couple HP/Enceinte. En fait c'est la transmittance simplifiée qui est

utilisée $T_{\gamma bc (p)} = (p^2 / \omega_b^2) / (p^2 / \omega_b^2 + p / \omega_b . Q_b + 1)$ (EC-120)

Les équations (EC-70,71) mènent à $k_{bc} = f_b / f_s = (1+a)^{1/2}$ (EC-121)

avec (EC-69) $a = V_{as} / V_b = k_{bc}^2 - 1$ (EC-122)

(EC-74,75,76) conduisent à: $Q_b = k_{bc} . Q_T$ (EC-123)

♦♦ Calcul de l'enceinte

L'allure d'un filtre du second ordre est principalement déterminée par son coefficient de qualité. Dans ce cas, c'est Q_b qui est déterminant.

Après avoir choisi Q_b en fonction de la courbure désirée

il faut déterminer $k_{bc} = Q_b / Q_T$ (EC-124)

qui conduit au volume $V_b = V_{as} / (k_{bc}^2 - 1)$ (EC-125)

et indique la fréquence de coupure de l'ensemble HP+enceinte $f_b = k_{bc} . f_s$ (EC-126)

Remarque

– La formule (EC-125) peut être écrite $V_b = V_{as} . Q_T^2 / (Q_b^2 - Q_T^2)$ (EC-127)

Ce qui montre que le coefficient Q_b doit être supérieur à Q_T

– Il montre également que le volume de l'enceinte sera d'autant plus élevé que les valeurs des deux coefficients seront proches pour tendre vers l'infini s'ils sont égaux.

– k_{bc} est supérieur à 1 ce qui confirme que f_b est supérieur à f_s

– Les coefficients les plus employés pour Q_b sont : 0,707 qui correspond à une réponse, espérée, maximaly flat appelée réponse de Butterworth ou, 0,577 qui correspond à une réponse de Bessel. Cette dernière a un temps de propagation de groupe constant (cf :Les filtres).

– L'analyse doit être traitée avec la transmittance réelle $T_{\gamma bc}$ et en tenant compte de l'effet passe bas de T_{et}

4 - Charge vue par l'amplificateur

La sortie de l'amplificateur fait office de générateur. Sa f.e.m instantanée est u_g et sa résistance interne R_g . Il délivre une tension u aux bornes du HP.

En tenant compte des descriptions précédentes, le schéma suivant permet d'évaluer la charge du générateur représentée par le HP.

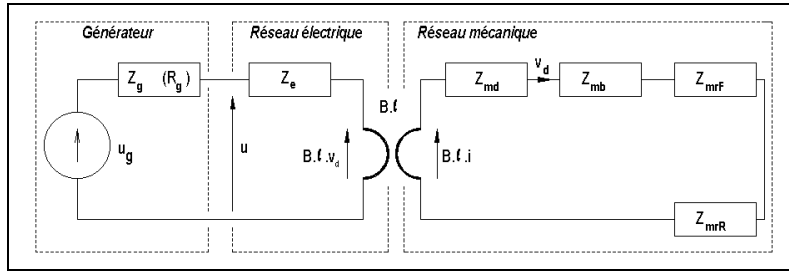


fig:5

La maille électrique s'écrit :

$$u - Z_e \cdot i - B.l \cdot v_d = 0 \quad (\text{EC-128})$$

La maille mécanique

$$B.l \cdot i - (Z_{md} + Z_{mb} + Z_{mrF} + Z_{mrR}) \cdot v_d = 0 \quad (\text{EC-129})$$

Afin de soulager l'écriture posons que la somme des impédances mécaniques:

$$Z_{mt} = Z_{md} + Z_{mb} + Z_{mrF} + Z_{mrR} \quad (\text{EC-130})$$

déduite de la maille mécanique $v_d = B.l \cdot i / Z_{mt}$

$$(\text{EC-131})$$

substituée par sa valeur dans la maille électrique, on déduit,

$$u = \left(Z_e + (B^2 l^2 / Z_{mt}) \right) \cdot i \quad (\text{EC-132})$$

Soit

$$Z_{et} = u/i = Z_e + (B^2 l^2 / Z_{mt}), \quad (\text{EC-133})$$

L'impédance électrique totale vue par l'amplificateur.

Dans laquelle apparaît l'impédance motionnelle du HP en enceinte close $Z_{embc} = B^2 l^2 / Z_{mt}$

$$(\text{EC-134})$$

♦ Impédance motionnelle du HP dans une enceinte close

Quoique d'allure identique, elle diffère de celle du HP seul.

Dans « Le HP électrodynamique - introduction », nous avons défini $Z_{md} = p \cdot M_{md} + R_{ms} + 1/p \cdot C_{ms}$, et

$Z_{mr} = p \cdot M_{mr} \cdot T_{Mmr}$ or le HP rayonnait identiquement de ses deux faces.

Dans le cas du HP en enceinte close seule la face externe à la boîte rayonne vers l'extérieur, comme le faisait cette même face du HP seul. Ainsi Z_{mr} devient Z_{mrF} et $M_{mr} \rightarrow M_{mrF}$

La somme des impédances mécaniques est :

$$Z_{mt} = p \cdot M_{md} + R_{ms} + 1/p \cdot C_{ms} + 1/p \cdot C_{mb} + p \cdot M_{mrF} \cdot T_{Mmr} + p \cdot M_{mrR} \quad (\text{EC-135})$$

et l'impédance motionnelle,

$$Z_{embc} = B^2 l^2 / (p \cdot M_{md} + R_{ms} + 1/p \cdot C_{ms} + 1/p \cdot C_{mb} + p \cdot M_{mrF} \cdot T_{Mmr} + p \cdot M_{mrR}) \quad (\text{EC-136})$$

Son inverse, l'admittance motionnelle s'écrit :

$$Y_{embc} = (p \cdot M_{md} / B^2 l^2) + (R_{ms} / B^2 l^2) + (1 / (p \cdot B^2 l^2 \cdot C_{ms})) + (1 / (p \cdot B^2 l^2 \cdot C_{mb})) + (p \cdot M_{mrF} \cdot T_{Mmr} / B^2 l^2) + (p \cdot M_{mrR} / B^2 l^2) \quad (\text{EC-137})$$

Ou encore

$$Y_{embc} = p \cdot C_{ed} + 1/R_{em} + 1/p \cdot M_{me} + 1/p \cdot M_{mb} + p \cdot C_{erF} \cdot T_{Mmr} + p \cdot C_{erR} \quad (\text{EC-138})$$

A condition de poser :

$$- C_{ed} = M_{md} / B^2 l^2 \quad (\text{EC-139})$$

$$- R_{em} = B^2 l^2 / R_{ms} \quad (\text{EC-140})$$

$$- M_{mb} = C_{ms} \cdot B^2 l^2 \quad (\text{EC-141})$$

$$- C_{erF} = M_{mrF} / B^2 l^2 \quad (\text{EC-142})$$

$$- C_{erR} = M_{mrR} / B^2 l^2 \quad (\text{EC-143})$$

On peut aussi considérer que $Y_{embc} = Y_{ed} + Y_{eb} + Y_{erF} + Y_{erR}$ (EC-144)

Avec

- $Y_{ed} = 1/Z_{ed} = p.C_{ed} + 1/R_{em} + 1/p.M_{me}$; (EC-145)

- $Y_{eb} = 1/Z_{eb} = 1/p.M_{mb}$; (EC-146)

- $Y_{erR} = 1/Z_{erR} = p.C_{erR}$ et, (EC-147)

- $Y_{erF} = 1/Z_{erF} = p.C_{erF} \cdot T_{Mmr}$ (EC-148)

dont les composants respectifs sont définis dans « Le HP électrodynamique - introduction ».

Et, les schémas des impédances motionnelles, complète et condensée apparaissent.

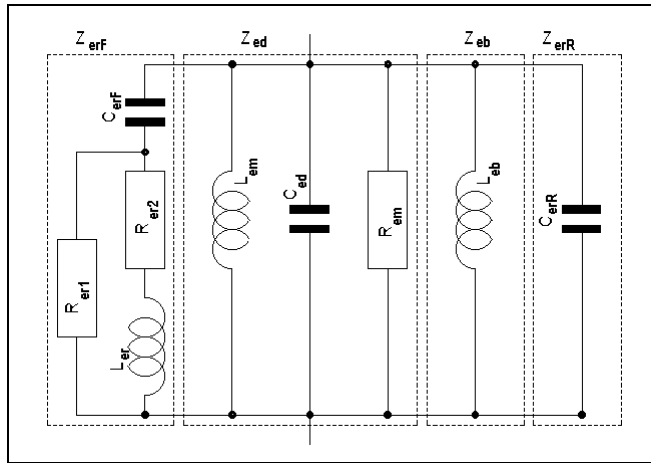


fig:6

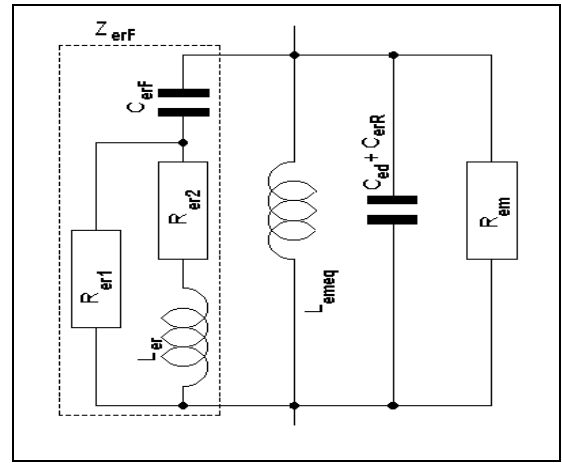


fig:7

La forme condensée fait apparaître L_{emeq} inductance résultant de la mise en parallèle de L_{em} et L_{eb}

Elle a pour valeur $L_{emeq} = L_{em} \cdot L_{eb} / L_{em} + L_{eb}$ (EC-149)

Le circuit électrique complet est reproduit dans la figure 8:

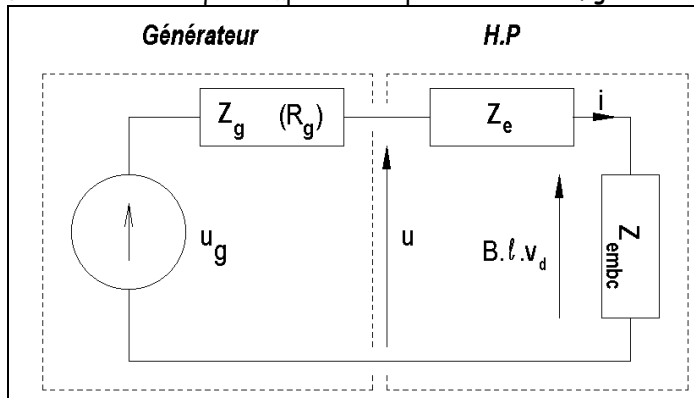


fig:8

Dans lequel:

- u_g est la f.e.m de l'amplificateur.
- u la tension présente aux bornes du HP
- Z_g , l'impédance de sortie de l'amplificateur majoré le l'impédance du câble de raccordement.
- L'impédance $Z_e = R_e + p.L_e$ est l'impédance purement électrique du HP.
- Et Z_{embc} l'impédance motionnelle (ou électrocinétique) du HP bafilé (dans son enceinte) aux bornes de laquelle apparaît la force contre électromotrice $B.l.v_d$. Physiquement inaccessible, elle n'existe que lorsque l'équipage mobile du HP est en mouvement.

