

- Le Haut-parleur électrodynamique - Analyse

1 Charge vue par l'amplificateur

Elle a été définie dans le chapitre précédent.

Son admittance motionnelle (HP-150) s'écrit : $Y_{em} = Y_{ed} + 2^*Y_{er}$ (HPA-1)

Dans laquelle (HP-155) $Y_{ed(p)} = p.C_{ed} + (1/R_{em}) + (1/p.L_{em})$ (HPA-2)

et (HP-162) $Y_{er(p)} = p.C_{er} . T_{mr(p)}$ (HPA-3)

L'impédance électrique totale du haut parleur (HP-144), somme des impédances électrique et motionnelle s'écrit : $Z_{HPt} = Z_{et} + 1/(Y_{ed} + 2^*Y_{er})$ (HPA-4)

✓ Charge simplifiée vue par l'amplificateur

Dans le cadre de la simplification nous avons préalablement posé $T'_{mr(p)} = 1$ et convenu implicitement qu'une apostrophe accompagne les grandeurs et les fonctions simplifiées.

Dans ce cas l'admittance de rayonnement (HPA-3) $Y'_{er(p)} = p.C_{er}$ (HPA-5)

Et l'admittance motionnelle se résume à $Y'_{em(p)} = p.(C_{ed} + 2^*C_{er}) + (1/R_{em}) + (1/p.L_{em})$ (HPA-6)

Qu'il est possible de réduire en convenant que $C_{em} = C_{ed} + 2^*C_{er}$ (HPA-7)

Ainsi $Y'_{em(p)} = p.C_{em} + (1/R_{em}) + (1/p.L_{em}) = (p^2.C_{em}.L_{em} + P.L_{em}/R_{em} + 1) / p.L_{em}$ (HPA-8)

Et $Z'_{HPt} = (R_e + R_g) . T_{e(p)} + R_{em} \left((p.L_{em}/R_{em}) / (p^2.C_{em}.L_{em} + P.L_{em}/R_{em} + 1) \right)$ (HPA-9)

Avec $L_{em} = C_{ms} . B^2 . l^2$,

$C_{em} = M_{ms} / B^2 . l^2$,

et $R_{em} = R_{ms} / B^2 . l^2$

A travers ces relations $C_{em}.L_{em} = M_{ms}.C_{ms} = 1/\omega_s^2$ (HPA-10)

et $L_{em}/R_{em} = C_{ms}.R_{ms} = 1/Q_{ms}$ (HPA-11)

l'expression de Z'_{HPt} est écrite à partir de paramètres mesurables, ou, fournis par le constructeur du HP.

$$Z'_{HPt(p)} = (R_e + R_g) / T_{e(p)} + R_{em} \left(p / \omega_s . Q_{ms} \right) / (p^2 / \omega_s^2 + P / \omega_s . Q_{ms} + 1) \quad (HPA-12)$$

Comme à l'habitude, afin de simplifier la lecture de Z_{HPt} convenons que

$$T'_{ms(p)} = (p / \omega_s . Q_{ms}) / (p^2 / \omega_s^2 + P / \omega_s . Q_{ms} + 1) \quad (HPA-13)$$

Qui représente la *fonction de transfert d'un filtre passe bande du second ordre*.

Sa transformation en s est immédiate. La variable s est définie en HP-213

$$T'_{ms(s)} = s / (s^2 + s/Q_{ms} + 1) \quad (HPA-14)$$

La transformation de celle de $T_{e(p)}$ vers $T_{e(s)}$ est en HP-217

nous conduit à $Z'_{HPt(s)} = ((R_e + R_g) / T_{e(s)}) + R_{em} . T'_{ms(s)}$ (HPA-15)

En factorisant par $R_{et} = R_e + R_g \Rightarrow Z'_{HPt(s)} = R_{et} . (1/T_{e(s)} + R_{em}/R_{et} . T'_{ms(s)})$, (HPA-16)

et, en appelant $k_{Re} = R_{em}/R_{et}$ (HPA-17)

$$Z'_{HPt(s)} = R_{et} . \left[1 + k_e . s + k_{Re} . s / Q_{ms} / (1 + s / Q_{ms} + s^2) \right] \quad (HPA-18)$$

k_e est développé en HP-216

$$\text{On aboutit à : } Z'_{HP(s)} = R_{et} \left[\frac{(1 + s(k_e + (k_{Re} + 1)/Q_{ms}) + s^2(k_e/Q_{ms}) + s^3.k_e)}{(1 + s/Q_{ms} + s^2)} \right] \quad (\text{HPA-19})$$

$$\text{que l'on peut écrire : } Z'_{HP(s)} = R_{et} \cdot T'_{HP(s)} \quad (\text{HPA-20})$$

$$\text{dans laquelle } T'_{HP(s)} = \left[\frac{(1 + s(1/Q_{ms} + k_e + k_{Re}) + s^2(k_e/Q_{ms}) + s^3.k_e)}{(1 + s/Q_{ms} + s^2)} \right] \quad (\text{HPA-21})$$

HPA-20 nous indique que l'allure générale de la courbe impédance fréquence est définie par $T'_{HP(s)}$.

✓ tracé de courbes

$T'_{HP(s)}$ est le rapport de deux polynômes que nous écrirons d'une manière générale

$$T'_{(s)} = \frac{N_0 + N_1.s + N_2.s^2 + \dots + N_n.s^n}{D_0 + D_1.s + D_2.s^2 + \dots + D_n.s^n} \quad (\text{HPA-22})$$

n est le degré de la fonction de transfert

$T'_{HP(s)}$, est du 3^o ordre

$$T'_{HP(s)} = \frac{N_0 + N_1.s + N_2.s^2 + N_3.s^3}{D_0 + D_1.s + D_2.s^2 + D_3.s^3} \quad (\text{HPA-23})$$

Dans laquelle les coefficients :

$$\text{du numérateur sont:} \quad (\text{HPA-24})$$

$$N_0 = 1 ; N_1 = k_e + (k_{Re} + 1)/Q_{ms} ; N_2 = 1 + (k_e/Q_{ms}) ; N_3 = k_e$$

$$\text{Et du dénominateur,} \quad (\text{HPA-25})$$

$$D_0 = 1 ; D_1 = 1/Q_{ms} ; D_2 = 1 ; D_3 = 0$$

Il est évident que j'aurais pu ne pas écrire le terme $D_3.s^3$ au dénominateur. Seul l'objectif de généraliser et de montrer la manière d'annuler un terme, m'en a empêché. Il est en effet très pratique lors du développement d'un programme d'établir une fonction, capable de calculer sur des polynômes de rangs plus élevés que nécessaire. L'annulation des termes d'ordres supérieurs à ceux pris en compte dans le calcul est alors indispensable.

$$s \text{ ramenée à un opérateur complexe soit } s = j.\omega/\omega_s = j.f/f_s \quad (\text{HPA-26})$$

$$\text{et, en écrivant} \quad X = \omega/\omega_s = f/f_s \quad (\text{HPA-27})$$

La variable est devenue X , elle même rapport d'une fréquence sur une fréquence de référence.

Ainsi quelle que soit f_s si $f=f_s$ $X=1$. Ce qui commence à faire entrevoir l'intérêt des calculs précédents. La

fonction de transfert $T'_{HP(s)}$ s'écrit

$$T'_{HP(jX)} = \frac{[N_0 + j.X.N_1 + j^2.X^2.N_2 + j^3.X^3.N_3]}{[D_0 + j.X.D_1 + j^2.X^2.D_2 + j^3.X^3.D_3]} \quad (\text{HPA-28})$$

qui devient

$$T'_{HP(jX)} = \frac{[(N_0 - X^2.N_2) + j(X.N_1 - X^3.N_3)]}{[(D_0 - X^2.D_2) + j(X.D_1 - X^3.D_3)]} \quad (\text{HPA-29})$$

Où l'on reconnaît :

$$\text{la partie réelle du numérateur} \quad \mathcal{R}_N = N_0 - X^2.N_2 \quad (\text{HPA-30})$$

$$\text{et sa partie réactive} \quad I_N = X.N_1 - X^3.N_3 \quad (\text{HPA-31})$$

$$\text{la partie réelle du dénominateur} \quad \mathcal{R}_D = D_0 - X^2.D_2 \quad (\text{HPA-32})$$

$$\text{et sa partie réactive} \quad I_D = X.D_1 - X^3.D_3 \quad (\text{HPA-33})$$

✓ ✓ Remarque 1

Les termes de degré pair sont réels, les termes de degré impairs sont réactifs et attachés à l'opérateur complexe j .

Pour caractériser une fonction de transfert, il est indispensable de connaître son module et son argument, l'angle de phase, pour chacune des valeurs de la variable.

✓ Module de la fonction de transfert

Il est la rapport du module T_N du numérateur sur celui du dénominateur T_D . X en est la variable

$$T_{HP(X)} = T_{N(X)}/T_{D(X)} \quad (\text{HPA-34})$$

$$\text{Dans laquelle} \quad T_{N(X)} = (\mathcal{R}_N^2 + I_N^2)^{1/2} \quad (\text{HPA-35})$$

$$\text{et} \quad T_{D(X)} = (\mathcal{R}_D^2 + I_D^2)^{1/2} \quad (\text{HPA-36})$$

✓ **Phase de la fonction de transfert**

✓ ✓ **Première Méthode**

La tangente de l'angle de phase du numérateur est donnée par le rapport entre sa partie réactive et sa partie réelle.

$$\operatorname{tg}(\varphi_N) = I_N / \mathcal{R}_N \quad (\text{HPA-37})$$

Il en va de même pour l'angle de phase du dénominateur

$$\operatorname{tg}(\varphi_D) = I_D / \mathcal{R}_D \quad (\text{HPA-38})$$

Pour finir, il suffit de calculer la tangente résultante

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \operatorname{tg}(\varphi_N - \varphi_D) = (\operatorname{tg}(\varphi_N) - \operatorname{tg}(\varphi_D)) / (1 + \operatorname{tg}(\varphi_D) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_N)) \quad (\text{HPA-39})$$

et d'en extraire l'angle en posant $\varphi = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg}(\varphi))$ (HPA-40)

✓ ✓ **Seconde méthode**

a travers les précédents développements HPA-29 peut s'exprimer sous la forme :

$$T_{HP(jX)} = (\mathcal{R}_N + j I_N) / (\mathcal{R}_D + j I_D) \quad (\text{HPA-41})$$

En multipliant haut et bas par l'expression conjuguée $\mathcal{R}_D - j I_D$, du dénominateur

$$T_{HP(jX)} = (\mathcal{R}_N + j I_N) \cdot (\mathcal{R}_D - j I_D) / (\mathcal{R}_D^2 + I_D^2) \quad (\text{HPA-42})$$

Ou l'on remarque que le dénominateur est égale au carré de $T_{D(x)}$

$$T_{HP(jX)} = (\mathcal{R}_N + j I_N) \cdot (\mathcal{R}_D - j I_D) / T_{D(x)}^2 \quad (\text{HPA-43})$$

Qui devient $T_{HP(jX)} = ((\mathcal{R}_N \cdot \mathcal{R}_D + I_N \cdot I_D) + j(I_N \cdot \mathcal{R}_D - \mathcal{R}_N \cdot I_D)) / T_{D(x)}^2$ (HPA-44)

Qui a l'avantage de pouvoir se formuler sous la forme

$$T_{HP(jX)} = \mathcal{R} + j \cdot I \quad (\text{HPA-45})$$

A condition de poser $\mathcal{R} = (\mathcal{R}_N \cdot \mathcal{R}_D + I_N \cdot I_D) / (\mathcal{R}_D^2 + I_D^2)$ (HPA-46)

Et $I = (I_N \cdot \mathcal{R}_D - \mathcal{R}_N \cdot I_D) / (\mathcal{R}_D^2 + I_D^2)$ (HPA-47)

Pour enfin poser $\varphi = \operatorname{arctg}(I/\mathcal{R})$ (HPA-48)

Cette 2° méthode apparemment lourde a un énorme avantage lors du tracé phase fréquence de la réponse du HP

✓ **Tracé de la courbe impédance fréquence simplifiée**

elle est point par point le reflet de $Z'_{HP(x)} = \operatorname{Ret}. T_{HP(x)}$

Elle est tracé sur un graphique ou nous trouvons les valeurs de X, ou de sa transposition en fréquence, sur l'axe des abscisses et le module de l'impédance en ordonnées.

✓ **Charge complète vue par l'amplificateur**

Après interprétation et développement l'équation de l'impédance électrique devient :

$$Z_{HP(s)} = R_{ef} \cdot \left[(1 + k_e \cdot s) + (s \cdot k_{Re} / Q_{ms}) / (1 + s/Q_{ms} + s^2(1 + 2 \cdot k_M(T_{mr(s)} - 1))) \right] \quad (\text{HPA-49})$$

En posant $T_{Rme(s)} = (s \cdot k_{Re} / Q_{ms}) / (1 + s/Q_{ms} + s^2(1 + 2 \cdot k_M(T_{mr(s)} - 1)))$ (HPA-50)

Une fonction de transfert intermédiaire qui, après développement devient

$$T_{Rme(s)} = (n_1 \cdot s + n_2 \cdot s^2 + n_3 \cdot s^3) / (1 + D_1 \cdot s + D_2 \cdot s^2 + D_3 \cdot s^3 + D_4 \cdot s^4) \quad (\text{HPA-51})$$

Et dans laquelle :

les coefficients du numérateur sont : (k_{tr} est développée en HP-225)

$$n_1 = k_{Re} / Q_{ms} \quad (\text{HPA-52})$$

$$n_2 = n_1 \cdot k_{tr} / Q_{dr} \quad (\text{HPA-53})$$

$$n_3 = k_{tr}^2 \cdot n_1 \quad (\text{HPA-54})$$

et les coefficients du dénominateur qui seront reportés obligatoirement dans la fonction de transfert finale,

$$D_1 = (k_{tr} / Q_{dr}) + (1 / Q_{ms}) \quad (\text{HPA-55})$$

$$D_2 = 1 + k_{tr}^2 + (k_{tr} / Q_{dr} \cdot Q_{ms}) \quad (\text{HPA-56})$$

$$D_3 = k_{tr} \cdot ((k_{tr} / Q_{ms}) + (2 \cdot k_M / Q_{nr}) + (1 - 2 \cdot k_M) / Q_{dr}) \quad (\text{HPA-57})$$

$$D_4 = k_{tr}^2 (1 - 2 \cdot k_M) \quad (\text{HPA-58})$$

Pour enfin aboutir à :

$$Z_{HP(s)} = R_{et} \cdot (1 + N_1 \cdot s + N_2 \cdot s^2 + N_3 \cdot s^3 + N_4 \cdot s^4 + N_5 \cdot s^5) / (1 + D_1 \cdot s + D_2 \cdot s^2 + D_3 \cdot s^3 + D_4 \cdot s^4) \quad (\text{HPA-59})$$

Où les coefficients du numérateurs

$$N_1 = n_1 + D_1 + k_e \quad (\text{HPA-60})$$

$$N_2 = n_2 + D_2 + k_e \cdot D_1 \quad (\text{HPA-61})$$

$$N_3 = n_3 + D_3 + k_e \cdot D_2 \quad (\text{HPA-62})$$

$$N_4 = D_4 + k_e \cdot D_3 \quad (\text{HPA-63})$$

$$N_5 = k_e \cdot D_4 \quad (\text{HPA-64})$$

L'impédance totale en fonction de la variable $X = f/f_s$ du HP s'écrit : (HPA-65)

$$Z_{HP(X)} = R_{et} \left((1 - N_2 \cdot X^2 + N_4 \cdot X^4) + j(N_1 \cdot X - N_3 \cdot X^3 + N_5 \cdot X^5) \right) / \left((1 - D_2 \cdot X^2 + D_4 \cdot X^4) + j(D_1 \cdot X - D_3 \cdot X^3) \right) \quad (\text{HPA-66})$$

Dans laquelle, nous reconnaissons

$$T_{HP(X)} = \left((1 - N_2 \cdot X^2 + N_4 \cdot X^4) + j(N_1 \cdot X - N_3 \cdot X^3 + N_5 \cdot X^5) \right) / \left((1 - D_2 \cdot X^2 + D_4 \cdot X^4) + j(D_1 \cdot X - D_3 \cdot X^3) \right) \quad (\text{HPA-67})$$

✓ Module de l'impédance complète

Et pour chacune des valeurs de X , le module de $Z_{HP(X)}$:

$$Z_{HP} = R_{et} \left[(\mathcal{R}_N^2 + I_N^2) / (\mathcal{R}_D^2 + I_D^2) \right]^{1/2} \quad (\text{HPA-68})$$

Où nous pouvons distinguer :

$$\mathcal{R}_N = 1 - N_2 \cdot X^2 + N_4 \cdot X^4 \quad (\text{HPA-69})$$

la partie réelle du numérateur

$$I_N = N_1 \cdot X - N_3 \cdot X^3 + N_5 \cdot X^5 \quad (\text{HPA-70})$$

sa partie imaginaire,

$$\mathcal{R}_D = 1 - D_2 \cdot X^2 + D_4 \cdot X^4 \quad (\text{HPA-71})$$

la partie réelle du dénominateur et,

$$I_D = D_1 \cdot X - D_3 \cdot X^3 \quad (\text{HPA-72})$$

sa partie imaginaire.

✓ Tracés des courbes impédance et phase fréquence

Tous les tracés qui suivent ont été programmés sur Scilab version 7-2. Programme de développement proche de Matlab mais qui a l'avantage d'être gratuit. L'INRIA a la gentillesse de le diffuser en freeware sur son site.

Evidemment le programme d'analyse du HP n'y est pas inclus et il vous faudra le développer.

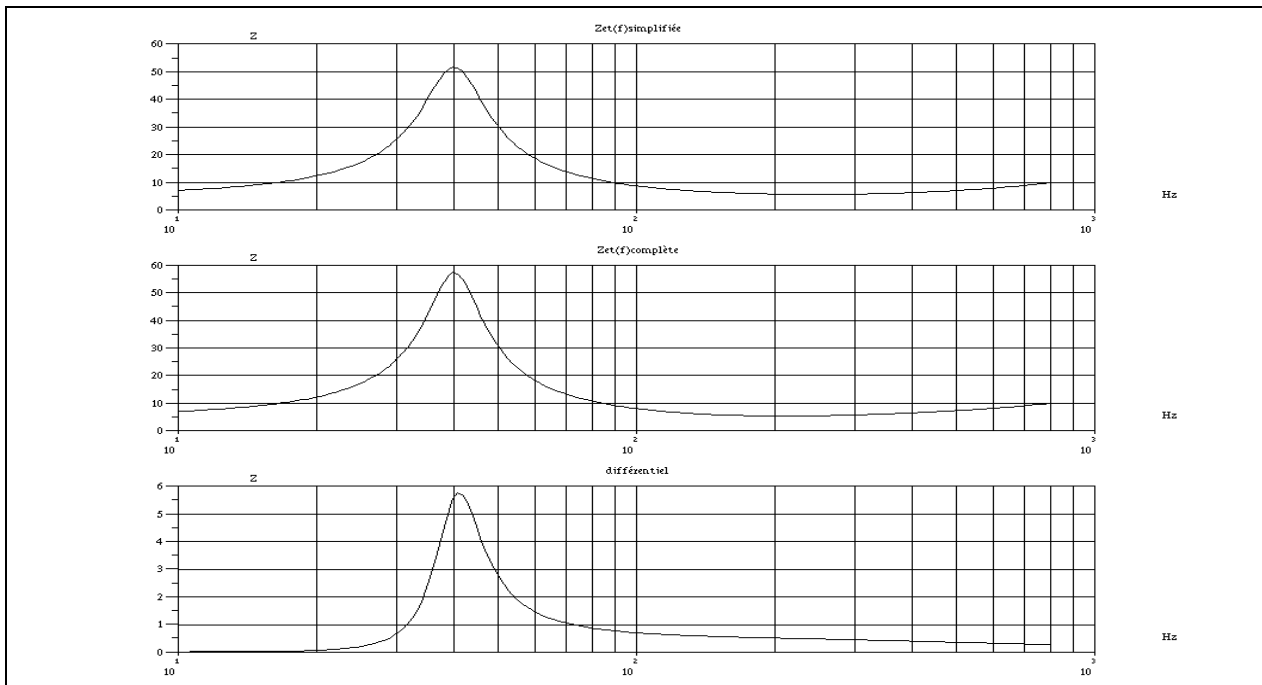
Le HP modélisé est le 2226 de JBL. HP professionnel en usage dans de nombreuses enceintes acoustiques de studios de musique et de post production cinéma.

Le constructeur délivre les caractéristiques suivantes : $L_e = 1.75_{mH}$; $R_e = 5 \Omega$; $B \cdot l = 19.6$; $S_d = 880 \text{cm}^2$; $f_s = 40 \text{Hz}$;

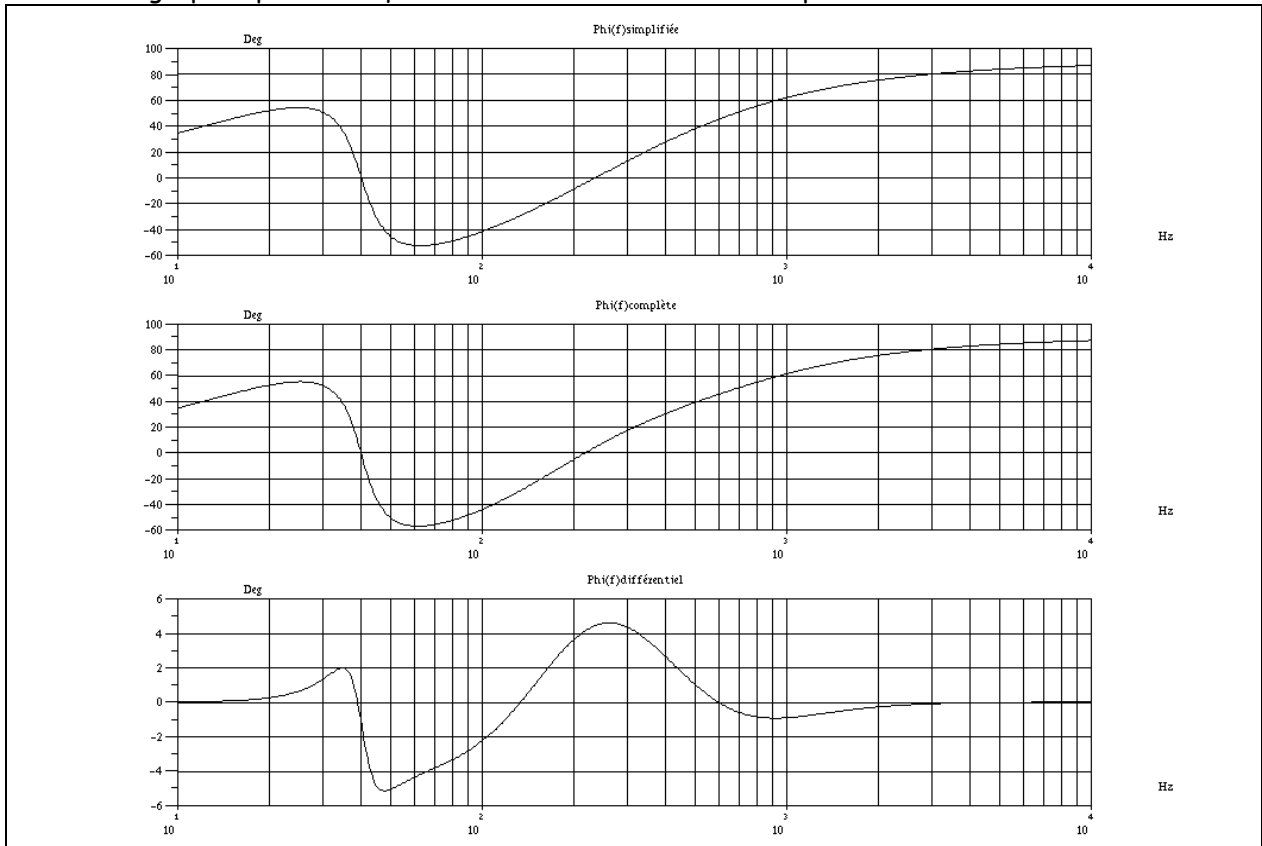
$V_{as} = 175 \text{dm}^3$; $Q_{ts} = 0.305$

Les deux premiers graphes ci dessous montrent les courbes impédance - fréquence issues de l'analyse simplifiée (figure haute) et de l'analyse complète (figure intermédiaire).

La troisième courbe (figure basse) montre la différence existant entre les modules de l'impédance complète et de l'impédance simplifiée.



Suivent les graphes phase-fréquence classés dans l'ordre défini précédemment



✓ Le cercle de Kennelly

L'équation HPA-45 montre que le module de l'impédance électrique $Z_{HP} = R_{et} \left[\mathcal{R}^2 + I^2 \right]^{1/2}$

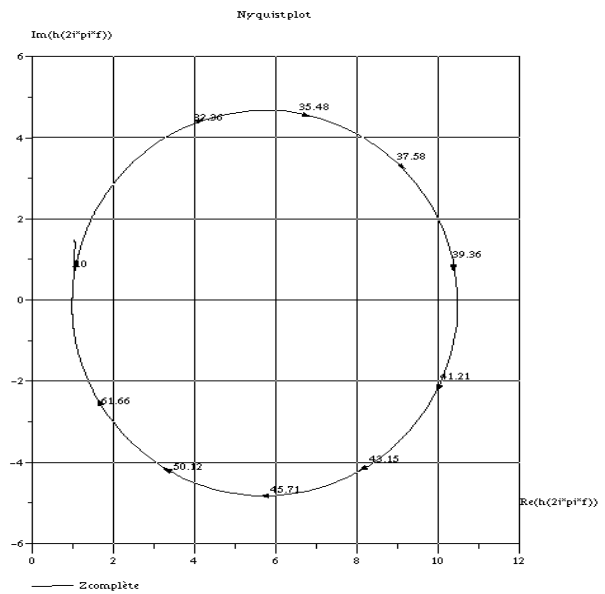
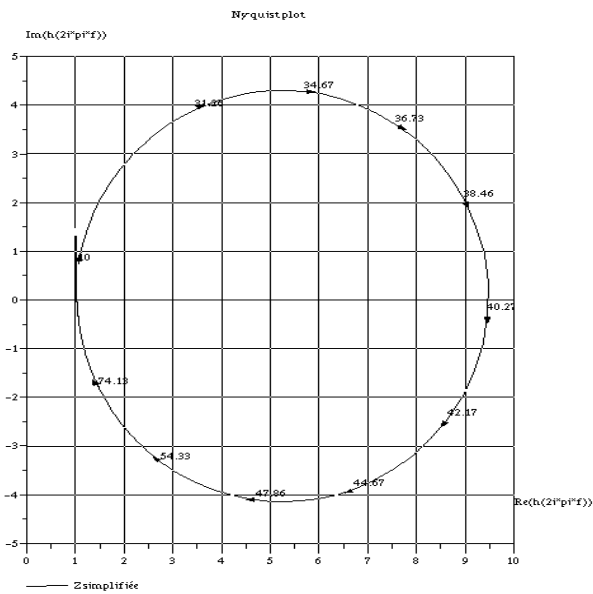
sa transformation mène à $(Z_{HP} / R_{et})^2 = \mathcal{R}^2 + I^2$

qui est une expression de la forme $r^2 = x^2 + y^2$, ou l'on reconnaît l'équation d'un cercle.

Dans notre cas, c'est l'équation du cercle de Kennelly.

On peut également l'écrire $(Z_{HP} / R_{et})^2 = \mathcal{R}^2 (1 + (I^2 / \mathcal{R}^2)) = \mathcal{R}^2 (1 + \text{tg}^2(\varphi))$

Son tracé est réalisé sur un plan complexe, appelé aussi, plan de Nyquist



2 Cinématique du HP

✓ Déplacement de l'équipage mobile

Il a été développée, sous ses formes complète et simplifiée, dans le chapitre d'introduction aux HP.

Quelle que soit la forme analysée, l'asymptote horizontale du déplacement est :

- proportionnel au facteur d'efficacité E du HP,
- proportionnel à la valeur maximale de la tension appliquée.
- Inversement proportionnel au produit $S_d \cdot \omega_s^2$

Si U_{eff} est la tension prise en compte la tension à reporter dans les calculs est $U = U_{eff} \cdot 1.414$.

La puissance P_{max} admissible par le HP est généralement donnée par le constructeur. Cette puissance, **produit de la tension efficace par l'intensité efficace** délivrées par la source, correspond électriquement à une **puissance moyenne**. La connaissance de la valeur de la tension U_{max} (et crête de surcroît) à prendre en compte peut être extraite de la formule : $U_{max} = (2 \cdot P_{max} \cdot Z_{nom})^{1/2}$ (HPA-73)

Où Z_{nom} est l'impédance de classification du HP. (2, 4, 8, ... Ω).

Il est significatif d'effectuer 2 tracés. L'un pour une tension appliquée correspondant à une puissance unitaire, l'autre pour la puissance admissible par le HP.

A une puissance $P=1w$ la tension à prendre en compte $U_0 = (2 \cdot Z_{nom})^{1/2}$. Une impédance caractéristique de 8 Ω (très fréquente) correspond une tension crête $U_0 = 4v$.

Le HP choisi pour modèle a cette impédance caractéristique, il admet une puissance moyenne $P_{max} = 300w$ et son déplacement maximal crête est de 20mm.

✓ ✓ Equation simplifiée :

Présente en **HP-245** elle s'exprime $x'_{d(s)} = u \cdot E \cdot T_{mx(s)} \cdot 1/S_d \cdot \omega_s^2$

La fonction de transfert mécanique déjà présente en **HP-242** est :

$$T_{mx(s)} = 1 / (s^2 + s/Q_t + 1)$$

C'est l'équation d'un **filtre passe bas du second ordre**.

□- tracé du déplacement d'après l'équation simplifiée

De ce qui précède un terme constant $\xi_x = E/S_d \cdot \omega_s^2$ se dégage. (HPA-74)

ξ_x (x_{si}) est le déplacement caractéristique du HP. Il correspond à l'asymptote horizontale de la courbe du déplacement, pour une tension appliquée : $U=1v$ crête soit 0.707v efficace.

La définition des coefficients, du rapport de polynôme de la fonction de transfert, est immédiat.

$D'_i = 1/Q_t$ (HPA-75)

Qu'il suffit de reporter dans l'expression suivante.

$$T_{mx(s)} = (1 / 1 + D'_1 \cdot s + s^2) \quad (\text{HPA-76})$$

En continuant à appeler $X = f/f_s = \omega/\omega_s$

Le tracé du déplacement de l'équipage mobile en fonction de la fréquence est obtenu :

- en calculant le module de

$$T_{mx(jx)} = \left[1 / ((1 - X^2) + j \cdot D'_1 \cdot X) \right], \quad (\text{HPA-77})$$

Dans lequel on reconnaît la partie réelle du dénominateur

$$R'_D = 1 - X^2 \quad (\text{HPA-78})$$

Et sa partie complexe $I'_D = D'_1 \cdot X$ (HPA-79)

En remarquant que le numérateur est réel.

Ainsi $T_{mx(x)} = (R'_D{}^2 + I'_D{}^2)^{-1/2}$ (HPA-80)

- et en le multipliant par $\xi \cdot U_0$ pour tracer la première courbe ou par $\xi \cdot U_{max}$ pour tracer la seconde.

Ainsi $x'_{d0(x)} = U_0 \cdot \xi_x \cdot T_{mx(x)}$ pour le premier tracé, et, (HPA-81)

$x'_{dmax(x)} = U_{max} \cdot \xi_x \cdot T_{mx(x)}$ pour le second. (HPA-82)

Remarque :

- La connaissance de $x_{d0(x)}$ à pour unique avantage de pouvoir évaluer le déplacement pour n'importe laquelle des puissances fournies au HP. On aurait pu en effet écrire

$$x'_{dmax(x)} = x_{d0(x)} \cdot (P_{max})^{1/2} \quad (\text{HPA-83})$$

A une autre puissance P : $x'_{d(x)} = x_{d0(x)} \cdot (P)^{1/2}$ (HPA-84)

✓ ✓ **Equation complète:**

Vous retrouverez son équation complète en **HP-231**. Après substitution :

$$x_{d(s)} = U \cdot \xi_x \cdot T_{e(s)} \cdot T_{mx(s)} \quad (\text{HPA-85})$$

Le développement de l'inverse de $T_{mx(s)}$ s'impose.

$$1/T_{mx(s)} = s^2(1 + 2 \cdot k_M(T_{Mmr(s)} - 1)) + s \cdot ((1 + k_{Rm} \cdot T_{e(s)})/Q_{ms}) + 1 \quad (\text{HPA-86})$$

dans laquelle $T_{Mmr(s)} - 1 = s \cdot k_{tr}(1/Q_{nr} - 1/Q_{dr}) - s^2 \cdot k_{tr}^2 / (1 + s \cdot k_{tr}/Q_{dr} + s^2 \cdot k_{tr}^2)$ (HPA-87)

et, $1 + k_{Rm} \cdot T_{e(s)} = (1 + k_{Rm} + s \cdot k_e) / (1 + s \cdot k_e)$ (HPA-88)

Après substitution et développement, et, afin de minimiser les erreurs posons :

$$1/T_{mx(s)} = ((s^2 + a_3 \cdot s^3 + a_4 \cdot s^4) / (1 + b_1 \cdot s + b_2 \cdot s^2)) + ((c_1 \cdot s + c_2 \cdot s^2) / (d_0 + s \cdot d_1)) + 1. \quad (\text{HPA-89})$$

Dans laquelle : $a_3 = k_{tr} \cdot (2 \cdot k_M ((1/Q_{nr}) - (1/Q_{dr})) + 1/Q_{dr})$; $a_4 = k_{tr}^2 (1 - 2 \cdot k_M)$; (HPA-90)

$b_1 = k_{tr}/Q_{dr}$; $b_2 = k_{tr}^2$; $c_1 = 1 + k_{Rm}$; $c_2 = k_e$; $e_0 = Q_{ms}$; $e_1 = k_e \cdot e_0$

qui conduit à poser $T_{mx(s)} = (1 + N_1 \cdot s + N_2 \cdot s^2 + N_3 \cdot s^3) / (1 + d_1 \cdot s + d_2 \cdot s^2 + d_3 \cdot s^3 + d_4 \cdot s^4 + d_5 \cdot s^5)$ (HPA-91)

avec : $N_1 = b_1 + e_1/e_0$; $N_2 = b_2 + (b_1 \cdot e_1/e_0)$; $N_3 = b_2 \cdot e_1/e_0$ (HPA-92)

$d_1 = b_1 + (c_1 + e_1)/e_0$; $d_2 = 1 + b_2 + (c_2 + c_1 \cdot b_1 + b_1 \cdot e_1)/e_0$; $d_3 = a_3 + (e_1 + b_1 \cdot c_2 + b_2 \cdot c_1 + b_2 \cdot e_1)/e_0$; (HPA-93)

$d_4 = a_4 + (a_3 \cdot e_1 + b_2 \cdot c_2)/e_0$; $d_5 = b_2 \cdot e_1/e_0$

Pour que le développement soit complet il est nécessaire d'effectuer le produit de $T_{e(s)}$ par $T_{mx(s)}$ ce qui nous fait découvrir la fonction de transfert globale du déplacement .

$$T_{x(s)} = T_{e(s)} \cdot T_{mx(s)} \quad (\text{HPA-94})$$

soit $T_{x(s)} = (1/(1 + k_e \cdot s)) \cdot ((1 + N_1 \cdot s + N_2 \cdot s^2 + N_3 \cdot s^3) / (1 + d_1 \cdot s + d_2 \cdot s^2 + d_3 \cdot s^3 + d_4 \cdot s^4 + d_5 \cdot s^5))$ (HPA-95)

qui nous donne le rapport de polynômes

$$T_{x(s)} = (1 + N_1 \cdot s + N_2 \cdot s^2 + N_3 \cdot s^3) / (1 + D_1 \cdot s + D_2 \cdot s^2 + D_3 \cdot s^3 + D_4 \cdot s^4 + D_5 \cdot s^5 + D_6 \cdot s^6) \quad (\text{HPA-96})$$

Le numérateur est inchangé. Les coefficients du dénominateur final sont :

$D_1 = d_1 + c_2$; $D_2 = d_2 + c_2 \cdot d_1$; $D_3 = d_3 + c_2 \cdot d_2$; $D_4 = d_4 + c_2 \cdot d_3$; $D_5 = d_5 + c_2 \cdot d_4$; $D_6 = c_2 \cdot d_5$ (HPA-97)

□- tracé du déplacement d'après l'équation complète

Le tracé du déplacement de l'équipage mobile en fonction de la fréquence est obtenu :

- en calculant le module de

$$T_{mx(jx)} = \left[(1 - N_2 \cdot X^2) + j(N_1 \cdot X - N_3 \cdot X^3) / ((1 - D_2 \cdot X^2 + D_4 \cdot X^4 - D_6 \cdot X^6) + j(D_1 \cdot X - D_3 \cdot X^3 + D_5 \cdot X^5)) \right], \quad \text{(HPA-98)}$$

Dans lequel on reconnaît la partie réelle du numérateur

$$R_N = 1 - N_2 \cdot X^2 \quad \text{(HPA-99)}$$

Ainsi que sa partie complexe $I_N = N_1 \cdot X - N_3 \cdot X^3$ (HPA-100)

La partie réelle du dénominateur. $R_D = 1 - D_2 \cdot X^2 + D_4 \cdot X^4 - D_6 \cdot X^6$ (HPA-101)

Et sa partie complexe $I_D = D_1 \cdot X - D_3 \cdot X^3 + D_5 \cdot X^5$ (HPA-102)

Ainsi $T_{mx(x)} = ((R_N^2 + I_N^2) / (R_D^2 + I_D^2))^{1/2}$ (HPA-103)

- et en le multipliant par $\xi_x \cdot U_0$ pour tracer la première courbe ou par $\xi_x \cdot U_{max}$ pour tracer la seconde.

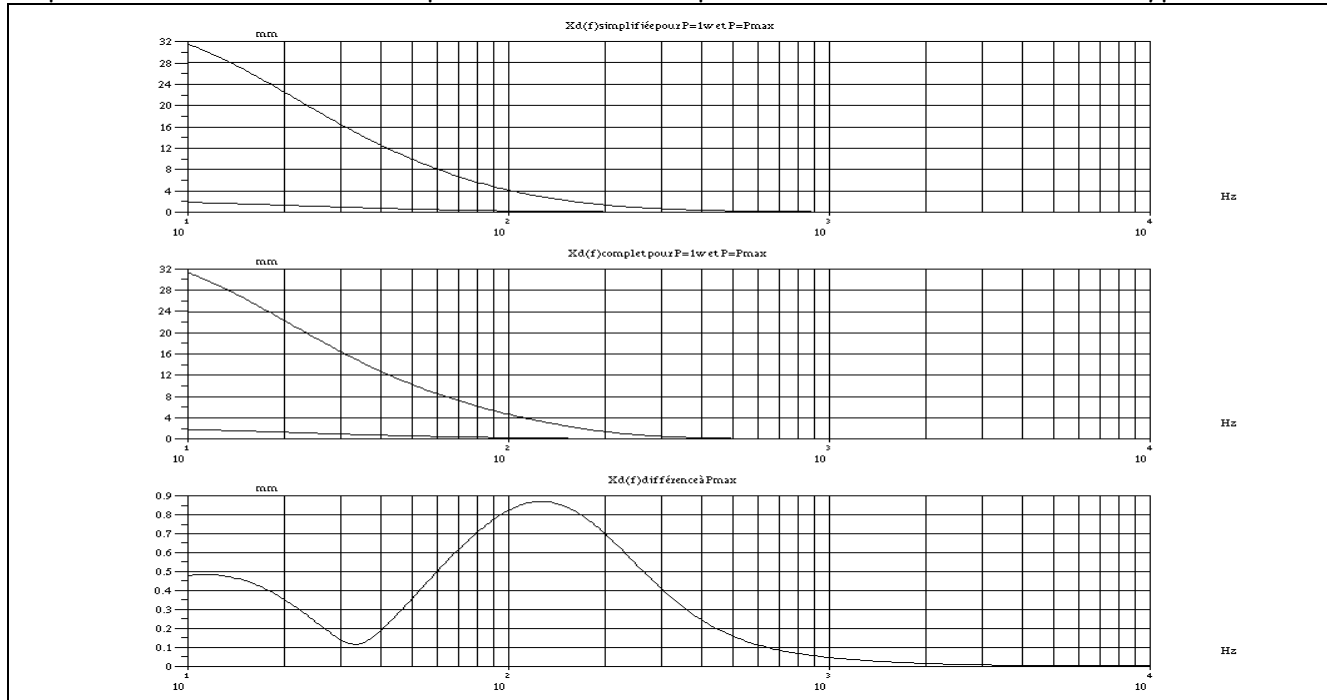
Ainsi $x_{d0(x)} = U_0 \cdot \xi_x \cdot T_{mx(x)}$ pour le premier tracé, et, (HPA-104)

$x_{dmax(x)} = U_{max} \cdot \xi_x \cdot T_{mx(x)}$ pour le second. (HPA-105)

Les valeurs de x_d sont exprimées en m. Pour les obtenir en mm il est nécessaire d'écrire chacune des formules précédentes en y incorporant un multiplicateur par 1000. Ainsi

$$x_{dmax(x)} \text{ (mm)} = 1000 \cdot U_{max} \cdot \xi_x \cdot T_{mx(x)} \quad \text{(HPA-106)}$$

Les deux graphes correspondants sont tracés sur la figure ci dessous. Le premier tracé correspond à l'étude simplifiée, le second à l'étude complète. Le troisième exprime la différence entre les deux types



✓ Volume d'air brassé par le HP:

Il est le produit du déplacement x_d de l'équipage mobile, par la surface S_d de la membrane.

S_d étant considérée constante l'allure de chacune des courbes est identique à celle du déplacement.

Son équation simplifiée, présentée dans **HP-240** est : $V'_{d(s)} = u \cdot E \cdot T'_{mx(s)} \cdot 1/\omega_s^2$ et

son équation complète, présente en **HP-196** est : $V'_{d(p)} = u \cdot E \cdot T_{e(p)} \cdot T_{mx(p)} \cdot 1/\omega_s^2$

Le volume d'air brassé, pour une tension de 1v appliquée aux bornes du HP et si les fonctions de transfert sont unitaires, est $V_0 = E/\omega_s^2$ (HPA-107)

On en déduit pour l'analyse simplifiée

$V'_{d0(x)} = U_0 \cdot V_0 \cdot T'_{mx(x)}$ pour le premier tracé, et, (HPA-108)

$V'_{dmax(x)} = U_{max} \cdot V_0 \cdot T'_{mx(x)}$ pour le second. (HPA-109)

Et pour l'analyse complète

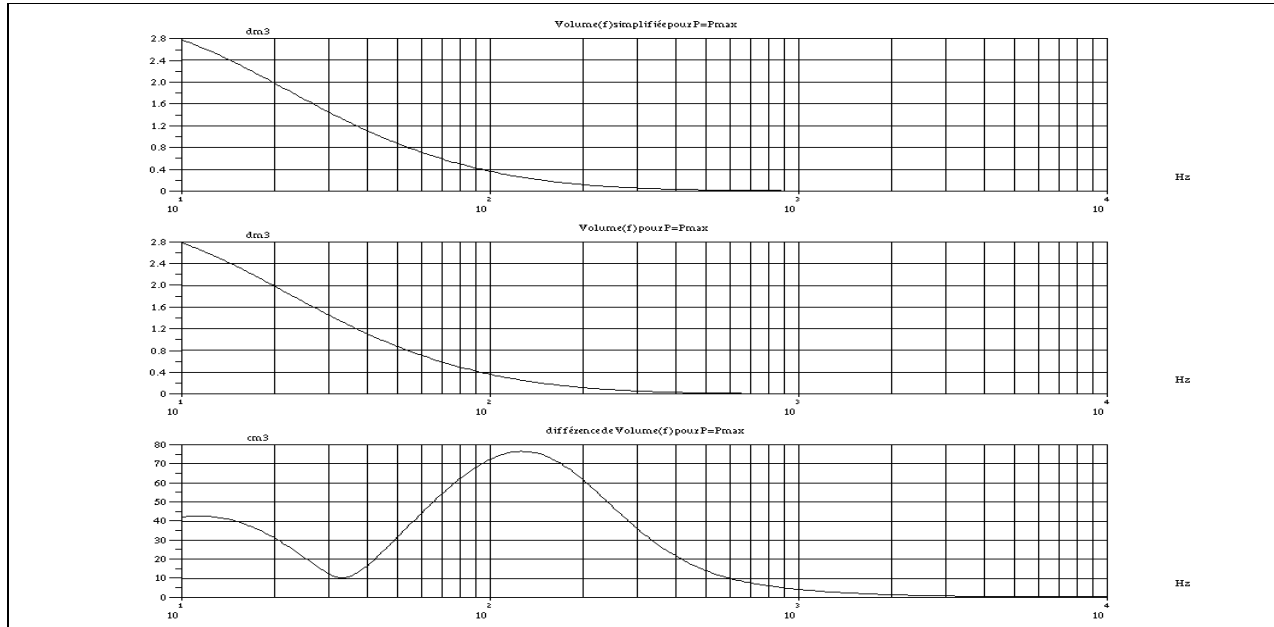
$$V_{d0(x)} = U_0 \cdot V_0 \cdot T_{mx(x)} \text{ pour le premier tracé, et,} \quad (\text{HPA-110})$$

$$V_{dmax(x)} = U_{max} \cdot V_0 \cdot T_{mx(x)} \text{ pour le second.} \quad (\text{HPA-111})$$

Au premier tracé de la figure suivante, correspondent respectivement les variations de volume en fonction de la fréquence de $V'_{d0(x)}$ et $V'_{dmax(x)}$ en dm^3

Au second correspondent les variations de volumes en fonction de la fréquence de $V_{d0(x)}$ et $V_{dmax(x)}$ en dm^3 .

Le troisième tracé exprime la différence entre $V_{dmax(x)}$ et $V'_{dmax(x)}$ exprimée en cm^3



✓ **Vitesse instantanée du diaphragme :**

Elle est la dérivée du déplacement instantané du diaphragme par rapport au temps.

Ses expressions, $v_{d(p)} = u \cdot E \cdot T_{e(p)} \cdot T_{mv(p)} \cdot 1/S_d \cdot \omega_s \Leftrightarrow v_{d(s)} = u \cdot E \cdot T_{e(s)} \cdot T_{mv(s)} \cdot 1/S_d \cdot \omega_s$ sont présentes en **HP-239**. Les relations qui unissent les fonctions de transfert de vitesse à celle du déplacement soient

$T_{mv(p)} = (p/\omega_s) T_{mx(p)} \Leftrightarrow T_{mv(s)} = s \cdot T_{mx(s)}$ sont présentes en **HP-235**.

✓ ✓ **Equation simplifiée :**

La fonction de transfert simplifiée de la vitesse, (**HP-243**) est :

$$T_{mv(s)} = s / (s^2 + s/Q_t + 1)$$

Elle représente l'équation d'un **filtre passe bande du second ordre**.

Remarque : Le dénominateur de la fonction de transfert de la vitesse simplifiée est identique à celui de la fonction de transfert du déplacement simplifié.

Les équations des vitesses approchée et réelle sont

$$v'_{d(s)} = u \cdot E \cdot T_{mv(s)} \cdot 1/S_d \cdot \omega_s$$

et,
$$v_{d(s)} = u \cdot E \cdot T_{e(s)} \cdot T_{mv(s)} \cdot 1/S_d \cdot \omega_s$$

Desquelles se dégage un terme commun et constant $\xi_v = E/S_d \cdot \omega_s$ (HPA-112)

ξ_v représente la vitesse caractéristique du HP.

L'asymptote horizontale de la courbe de vitesse, pour une tension appliquée : $U=1v$ crête soit $0.707v$ efficace se situera à une valeur $v=u \cdot \xi_v / Q_t$ (HPA-113)

Remarque : $\xi_v = \xi_x \cdot \omega_s$ (HPA-114)

□- **tracé de la vitesse d'après l'équation simplifiée**

La méthode de développement, préliminaire au tracé, est similaire à celle adoptée pour le déplacement. Les coefficients du dénominateur sont identiques à ceux adoptés pour le déplacement.

Le tracé de la vitesse approchée du diaphragme en fonction de la variable X est obtenu :

- en calculant le module de

$$T_{mv(jx)} = \left[\frac{jX}{(1 - X^2) + j \cdot D'_1 \cdot X} \right], \quad (\text{HPA-115})$$

Dans lequel on reconnaît la partie réelle du dénominateur

$$R'_D = 1 - X^2 \quad (\text{HPA-116})$$

Et sa partie complexe $I'_D = D'_1 \cdot X$ (HPA-117)

En remarquant que le numérateur est complexe $I'_N = X$ (HPA-118)

Ainsi $T_{mv(x)} = I'_N / (R'_D{}^2 + I'_D{}^2)^{1/2}$ (HPA-119)

- et en le multipliant par $\xi_v \cdot U_0$ pour tracer la première courbe ou par $\xi_v \cdot U_{\max}$ pour tracer la seconde.

Ainsi $v'_{d0(x)} = U_0 \cdot \xi_v \cdot T_{mv(x)}$ pour le premier tracé, et, (HPA-120)

$v'_{dmax(x)} = U_{\max} \cdot \xi_v \cdot T_{mv(x)}$ pour le second. (HPA-121)

Dans ces dernières formules l'indice x est celui de la variable $X = \omega / \omega_s$

□- tracé de la vitesse d'après l'équation réelle

A partir de l'équation de la fonction de transfert du déplacement (HPA-96) et en sachant qu'une multiplication de son numérateur par s permet de déterminer la fonction de transfert de la vitesse.

$$T_{mv(s)} = (s + N_1 \cdot s^2 + N_2 \cdot s^3 + N_3 \cdot s^4) / (1 + D_1 \cdot s + D_2 \cdot s^2 + D_3 \cdot s^3 + D_4 \cdot s^4 + D_5 \cdot s^5 + D_6 \cdot s^6) \quad (\text{HPA-122})$$

Où les coefficients du numérateur restent inchangés.

Le module de la vitesse réelle de l'équipage mobile en fonction de la variable X s'écrit

$$T_{mv(jx)} = \left[\frac{(N_3 \cdot X^4 - N_1 \cdot X^2) + j(X - N_2 \cdot X^3)}{(1 - D_2 \cdot X^2 + D_4 \cdot X^4 - D_6 \cdot X^6) + j(D_1 \cdot X - D_3 \cdot X^3 + D_5 \cdot X^5)} \right], \quad (\text{HPA-123})$$

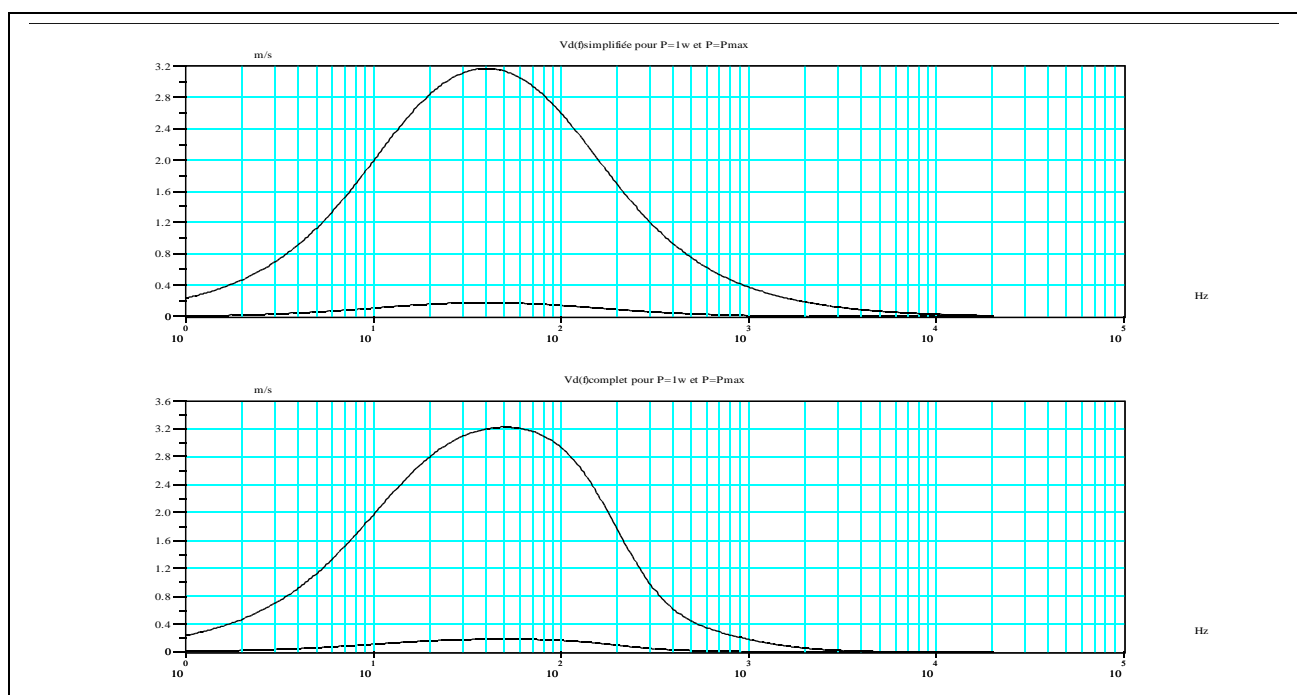
Dans lequel la partie réelle du numérateur est : $R_N = N_3 \cdot X^4 - N_1 \cdot X^2$ (HPA-124)

et sa partie complexe $I_N = X - N_2 \cdot X^3$ (HPA-125)

Les parties réelles et complexes du dénominateur sont éditées en **HPA-101 et HPA-102**

Les courbes définitives sont comme au par avant obtenues en multipliant le module de la fonction de transfert par $\xi_v \cdot U_0$ pour tracer la courbe correspondant à une puissance de 1w consommée par le HP ou par $\xi_v \cdot U_{\max}$ pour la puissance maximale admissible.

Vous trouverez ci dessous les deux courbes de vitesse de notre HP modèle. La première figure représente la courbe de vitesse approchée, la seconde la courbe de vitesse réelle. Afin de les rendre plus évidentes l'axe des abscisses est gradué de 1Hz à 100kHz. (Je désirai 20kHz, mais SCILAB préfère les décades complètes.)



La différence entre les deux courbes est flagrante.

✓ **Flux de vitesse:**

Il est le produit de la vitesse v_d de déplacement de l'équipage mobile, par la surface S_d de la membrane. Il est aussi la dérivée du volume brassé par la membrane en fonction du temps. Il s'exprime en m^3/s

Son équation simplifiée est :

$$\Phi'_{v(s)} = u \cdot E \cdot T'_{mv(s)} \cdot 1/\omega_s$$

et son équation complète, présente en **HP-240** est : $\Phi_{v(s)} = u \cdot E \cdot T_{e(s)} \cdot T_{mv(s)} \cdot 1/\omega_s$

Le flux de vitesse, pour une tension de 1v appliquée aux bornes du HP en considérant les fonctions de transfert unitaires, est

$$\Phi_{0v} = E/\omega_s \tag{HPA-126}$$

On en déduit pour l'analyse simplifiée

$$\Phi'_{v0(x)} = U_0 \cdot \Phi_{0v} \cdot T'_{mv(x)} \text{ pour le premier tracé, et,} \tag{HPA-127}$$

$$\Phi'_{vmax(x)} = U_{max} \cdot \Phi_{0v} \cdot T'_{mv(x)} \text{ pour le second.} \tag{HPA-128}$$

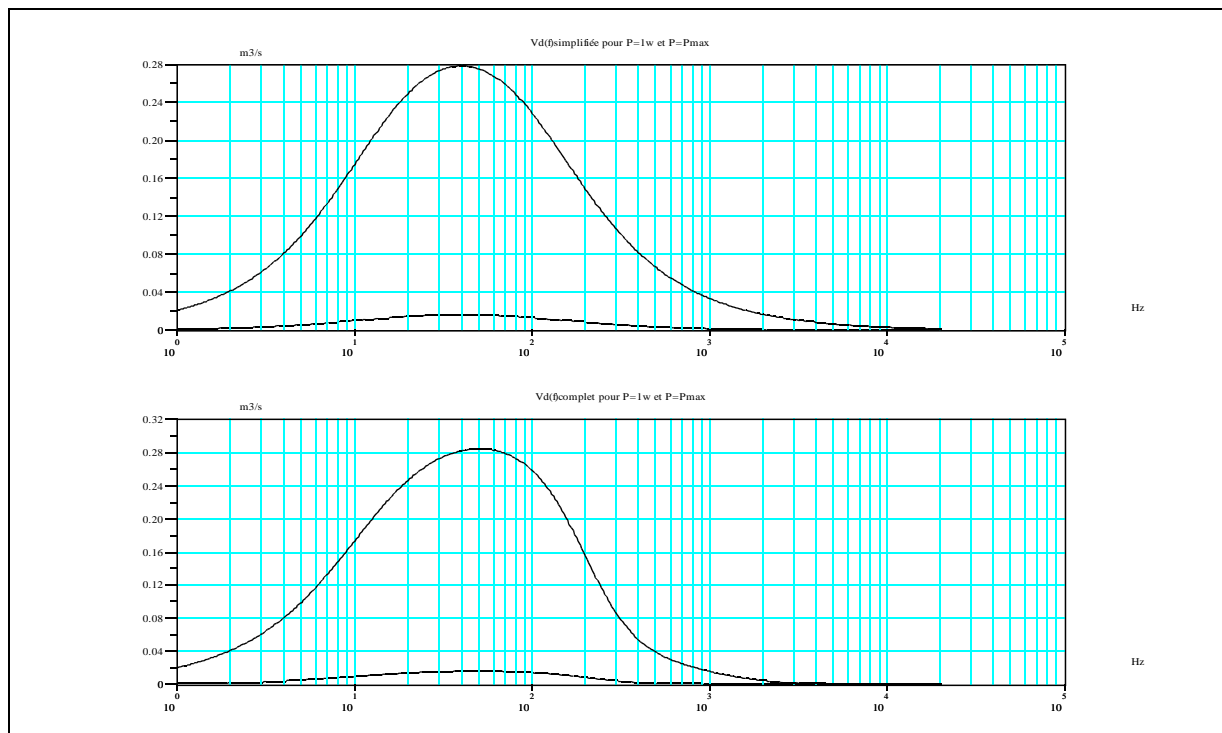
Et pour l'analyse complète

$$\Phi_{v0(x)} = U_0 \cdot \Phi_{0v} \cdot T_{mv(x)} \text{ pour le premier tracé, et,} \tag{HPA-129}$$

$$\Phi_{vmax(x)} = U_{max} \cdot \Phi_{0v} \cdot T_{mv(x)} \text{ pour le second.} \tag{HPA-130}$$

Au premier graphe de la figure suivante, correspondent respectivement les flux de vitesse(en m^3/s) en fonction de la fréquence, de $\Phi'_{v0(x)}$ et $\Phi'_{vmax(x)}$.

Au second correspondent les flux de vitesse en fonction de la fréquence de $\Phi_{v0(x)}$ et $\Phi_{vmax(x)}$.



✓ **Accélération instantanée du diaphragme:**

Elle est la dérivée seconde du déplacement instantané du diaphragme par rapport au temps.

Son expressions, $\gamma_{d(s)} = u \cdot E \cdot T_{e(s)} \cdot T_{m\gamma(s)} / S_d$ est issue de **HP-187**

avec

$$T_{m\gamma(s)} = s^2 \cdot T_{mx(s)}$$

✓ ✓ **Equation simplifiée :**

La fonction de transfert simplifiée de l'accélération est

$$T'_{m\gamma(s)} = s^2 / (s^2 + s/Q_t + 1)$$

Elle représente l'équation d'un **filtre passe haut du second ordre**.

Remarque : Le dénominateur de la fonction de transfert de l'accélération simplifiée est identique à celui des fonctions de transfert du déplacement et de vitesse simplifiés.

Les équations des vitesses approchée et réelle sont

$$\gamma'_{d(s)} = u \cdot E \cdot T_{m\gamma(s)} \cdot 1/S_d$$

et,
$$\gamma_{d(s)} = u \cdot E \cdot T_{e(s)} \cdot T_{m\gamma(s)} \cdot 1/S_d$$

Desquelles se dégage un terme commun et constant $\xi_Y = E/S_d$ (HPA-131)

ξ_Y représente l'accélération caractéristique du HP. Il correspond à l'asymptote horizontale de la courbe d'accélération, pour une tension appliquée : $U=1v$ crête soit $0.707v$ efficace.

Remarque : $\xi_Y = \xi_x \cdot \omega_s^2$ (HPA-132)

□- tracé de l'accélération d'après l'équation simplifiée

La méthode de développement, préliminaire au tracé, reste la même. Les coefficients du dénominateur sont identiques à ceux adoptés pour le déplacement.

Le tracé de la vitesse approchée du diaphragme en fonction de la variable X est obtenu :

- en calculant le module de

$$T_{m\gamma(jx)} = \left[\frac{-X^2}{(1 - X^2) + j \cdot D'_1 \cdot X} \right], \quad \text{(HPA-133)}$$

Dans lequel on reconnaît la partie réelle du dénominateur

$$R'_D = 1 - X^2 \quad \text{(HPA-134)}$$

Et sa partie complexe $I'_D = D'_1 \cdot X$

$$\text{(HPA-135)}$$

En remarquant que le numérateur est réel . $R'_N = -X^2$

$$\text{(HPA-136)}$$

Ainsi $T_{mv(x)} = R'_N / (R'_D{}^2 + I'_D{}^2)^{1/2}$

$$\text{(HPA-137)}$$

- et en le multipliant par $\xi_Y \cdot U_0$ pour tracer la première courbe ou par $\xi_Y \cdot U_{max}$ pour tracer la seconde.

Ainsi $\gamma'_{d0(x)} = U_0 \cdot \xi_Y \cdot T_{mv(x)}$ pour le premier tracé, et, (HPA-138)

$$\gamma'_{dmax(x)} = U_{max} \cdot \xi_Y \cdot T_{mv(x)} \quad \text{pour le second.} \quad \text{(HPA-139)}$$

□- tracé de l'accélération d'après l'équation réelle

A partir de l'équation de la fonction de transfert du déplacement (HPA-96) et en sachant qu'une multiplication de son numérateur par s^2 permet de déterminer la fonction de transfert de l'accélération

$$T_{m\gamma(s)} = (s^2 + N_1 \cdot s^3 + N_2 \cdot s^4 + N_3 \cdot s^5) / (1 + D_1 \cdot s + D_2 \cdot s^2 + D_3 \cdot s^3 + D_4 \cdot s^4 + D_5 \cdot s^5 + D_6 \cdot s^6) \quad \text{(HPA-140)}$$

Ou les coefficients du numérateur restent inchangés.

Le module de la vitesse réelle de l'équipage mobile en fonction de la variable X s'écrit

$$T_{m\gamma(jx)} = \left[\frac{(N_2 \cdot X^4 - X^2) + j(N_3 \cdot X^5 - N_1 \cdot X^3)}{(1 - D_2 \cdot X^2 + D_4 \cdot X^4 - D_6 \cdot X^6) + j(D_1 \cdot X - D_3 \cdot X^3 + D_5 \cdot X^5)} \right], \quad \text{(HPA-141)}$$

Dans lequel la partie réelle du numérateur est : $R'_N = N_2 \cdot X^4 - X^2$ (HPA-142)

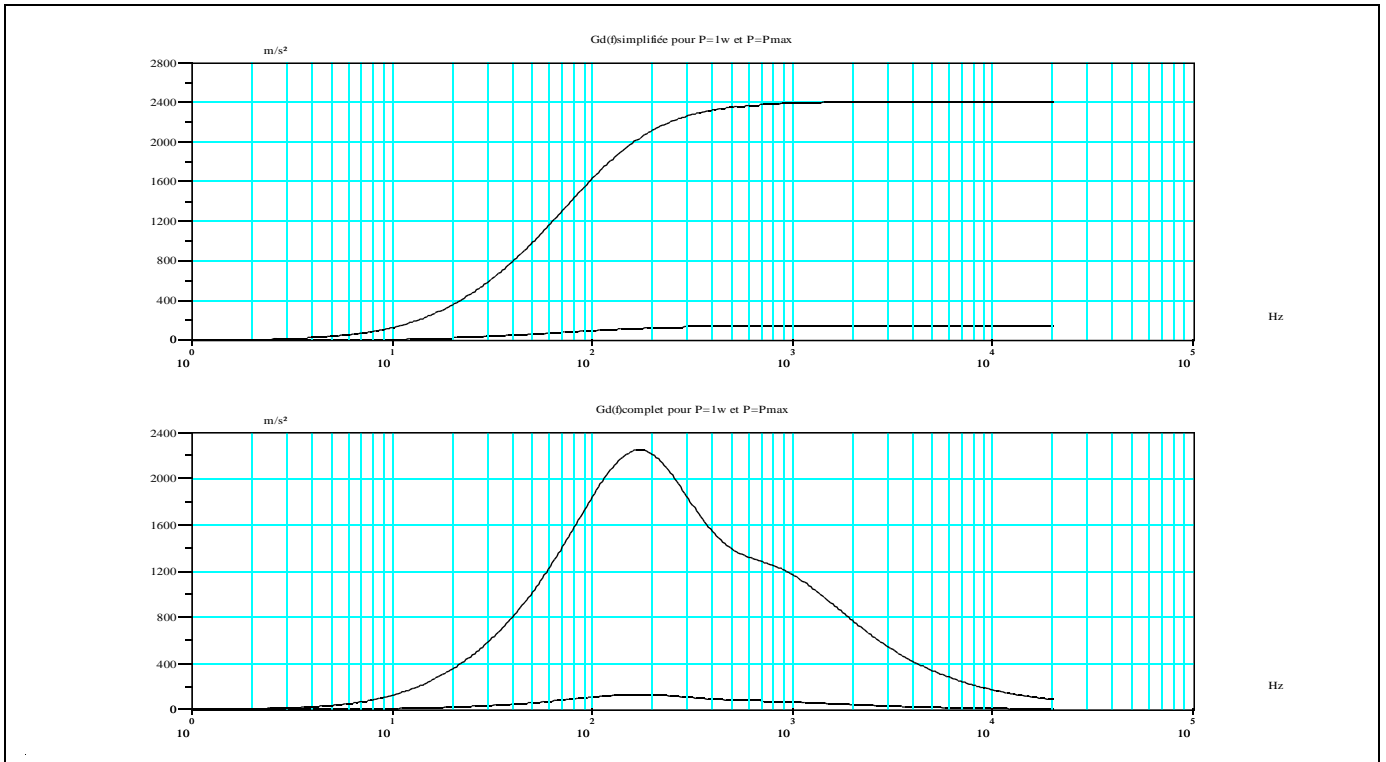
et sa partie complexe

$$I'_N = N_3 \cdot X^5 - N_1 \cdot X^3 \quad \text{(HPA-143)}$$

Les parties réelles et complexes du dénominateur sont inchangées et éditées en **HPA-101 et HPA-102**

Les courbes définitives sont comme au par avant obtenues en multipliant le module de la fonction de transfert par $\xi_Y \cdot U_0$ pour tracer la courbe correspondant à une puissance de $1w$ consommée par le HP ou par $\xi_Y \cdot U_{max}$ pour la courbe correspondant à la puissance maximale admissible.

La figure suivante comprend les courbes simplifiée et réelle de l'accélération (en m/s^2) du HP modèle.



La différence est visuellement suffisante pour convaincre de la nécessité d'adopter l'équation réelle du mouvement lors de l'évaluation d'un système.

✓ **Flux d'accélération:**

Il est le produit de l'accélération γ_d de l'équipage mobile, par la surface S_d de la membrane.

Il est aussi la dérivée seconde du volume d'air brassé par rapport au temps, et s'exprime en m^3/s^2

Son équation simplifiée est : $\Phi'_{\gamma(s)} = u \cdot E \cdot T'_{m\gamma(s)}$

et son équation complète , $\Phi'_{\gamma(s)} = u \cdot E \cdot T_{e(s)} \cdot T_{m\gamma(s)}$

Le coefficient du flux d'accélération , déterminé pour une tension u , de 1v appliquée aux bornes du HP est :

$$\Phi_{0\gamma} = E' \quad (\text{HPA-144})$$

On en déduit pour l'analyse simplifiée

$$\Phi'_{\gamma 0(x)} = U_0 \cdot E \cdot T'_{m\gamma(x)} \quad \text{pour le premier tracé, et,} \quad (\text{HPA-145})$$

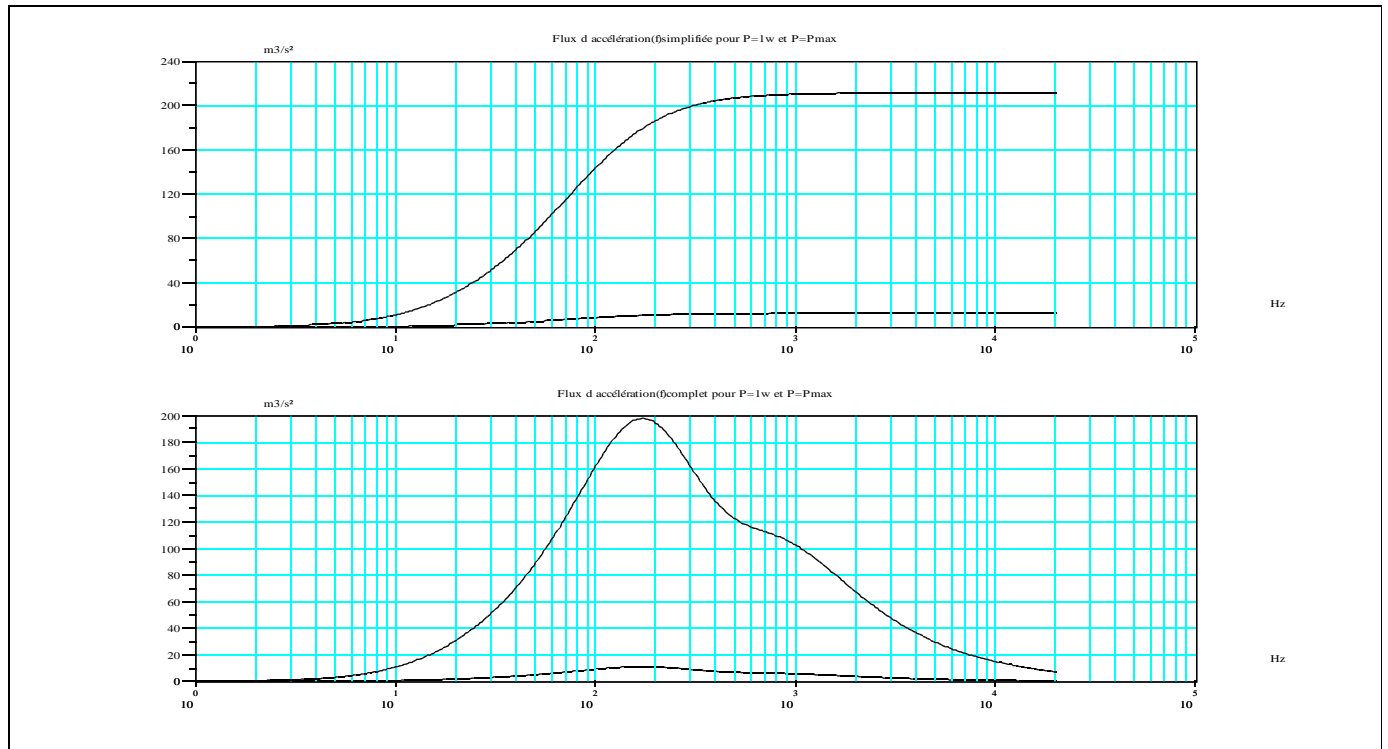
$$\Phi'_{\gamma \max(x)} = U_{\max} \cdot E \cdot T'_{m\gamma(x)} \quad \text{pour le second.} \quad (\text{HPA-146})$$

Et pour l'analyse complète

$$\Phi_{\gamma 0(x)} = U_0 \cdot E \cdot T_{m\gamma(x)} \quad \text{pour le premier tracé, et,} \quad (\text{HPA-147})$$

$$\Phi_{\gamma \max(x)} = U_{\max} \cdot E \cdot T_{m\gamma(x)} \quad \text{pour le second.} \quad (\text{HPA-148})$$

Les courbes correspondantes sont regroupées dans la figure suivante. Leur ordre est le même que dans les figures précédentes.



✓ **Réponse fréquentielle du HP**

✓ ✓ **Niveau SPL en fonction de la fréquence**

Dans HP-250, la pression acoustique, délivrée par le HP et supposé rayonner uniformément dans un angle solide de $4.\pi$ stéradians est :

$$P_{a4\pi(s)} = \Phi_{\gamma d(s)} \cdot \rho$$

A 1 m de la source et ramenée à une surface de $1m^2$, soit un angle solide de 1 st, la pression acoustique est :

$$P_{a(s)} = \Phi_{\gamma d(s)} \cdot \rho / 4.\pi$$

Que l'on peut transposer en $P_{a(x)} = \rho \cdot u \cdot E \cdot T_{m\gamma(x)} / 4.\pi$ (HPA-149)

exprimée en dB.SPL

$$N_{dB} = 20.\log(P_{a(x)} / P_0)$$

ou $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ pascals est notre seuil d'audition et notre référence de pression acoustique.

Le niveau d'audition SPL s'écrit $N_{dB} = 20.\log(10^5 \cdot \rho \cdot u \cdot E \cdot T_{m\gamma(x)} / 8.\pi)$ soit (HPA-150)

$$N_{dB} = 20*\log(u) + 20*\log(E) + 20*\log(\rho) + 20*\log(10^5/2) - 20*\log(4.\pi) + 20*\log(T_{m\gamma(x)})$$
 (HPA-151)

tout cela pour le mettre sous la forme : $N_{dB} = 72 + N_{db(u)} + N_{db(E)} + N_{db(\rho)} + N_{db(T_{m\gamma(x)})}$ (HPA-152)

Dans laquelle,

l'influence du facteur d'efficacité est : $N_{db(E)} = 20*\log(E)$, (HPA-153)

celle du milieu et de son état : $N_{db(\rho)} = 20*\log(\rho)$, (HPA-154)

celle du module de la fonction de transfert : $N_{db(T_{m\gamma(x)})} = 20*\log(T_{m\gamma(x)})$, (HPA-155)

l'action du générateur : $N_{db(u)} = 20*\log(u)$, (HPA-156)

et la constante : $72 = 94 - 22 = 20*\log(10^5/2) - 20*\log(4.\pi)$ (HPA-157)

94 dB étant le niveau SPL obtenu pour une pression acoustique de 1 Pascal.

✓ ✓ **Phase en fonction de la fréquence**

En écrivant $T_{m\gamma(x)} = R + j.I$ (HPA-158)

A condition de poser $R = (R_N \cdot R_D + I_N \cdot I_D) / (R_D^2 + I_D^2)$ (HPA-159)

Et
$$I = (I_N \cdot R_D - R_N \cdot I_D) / (R_D^2 + I_D^2)$$
 (HPA-160)

On obtient
$$\varphi = \arctg(I/R)$$
 (HPA-161)

✓ ✓ **Diagrammes de Bode**

Afin de rester conforme aux développements précédents, deux familles de courbes sont tracées. Chacune comporte le tracé du module de la pression acoustique exprimé en dB SPL et de la phase en fonction de la fréquence. Ce type de tracé est couramment appelé diagramme de Bode.

Elles correspondent à une tension appliquée telle, que le HP soit supposé dissiper 1w dans son impédance normalisée de 8 Ω, soient 4v crête.

La première intéresse l'analyse simplifiée, l'autre l'analyse complète. Dans les deux cas le HP est considéré rayonner, uniformément, dans un angle solide de $4 \cdot \pi$. Les résonances propres aux matériaux constituant l'équipage mobile sont négligées.

