

Comprendre l'Electroacoustique (24)

L'ENCEINTE A CHARGE SYMETRIQUE

INTRODUCTION

C'est étrange, cette absence de littérature relative à l'enceinte à charge symétrique: 900 pages de l'Anthologie de l'AES en petits caractères sur deux colonnes, consacrées aux haut-parleurs et enceintes acoustiques, et rien ou alors seulement quelques allusions sur le sujet. Il en va de même dans les quelques ouvrages consacrés à l'électroacoustique: souvent trop succincts et difficilement utilisables pour que l'amateur puisse procéder lui-même à la conception de ce type d'enceinte.

P. Augris et D. Santens (ref. [1]) font la même observation, et leur article est le seul qui me paraisse suffisamment détaillé pour l'amateur désireux d'optimiser ce type de charge.

Pour ce qui nous concerne, nous tirerons les conséquences des éléments d'ores et déjà disponibles dans les précédents numéros de AFDERS Confidences: le formalisme suivi pourra donc s'écarter de l'article précité. Nous vérifierons toutefois sur une application pratique que nos résultats concordent bien avec ceux de ces auteurs. Une confrontation des courbes obtenues avec nos formules et le logiciel BOXCALC montrera une grande cohérence entre les résultats obtenus.

Nous reviendrons ensuite sur les règles de conception de la référence [1], et établirons le même type d'abaques, mais pour des plages de valeurs plus étendues des différents paramètres.

Ces abaques permettent de dégrossir le problème et notamment de choisir un Haut-Parleur en fonction de l'objectif visé. Leur portée est toutefois restreinte aux cas très simplifiés où:

- la fréquence d'accord du résonateur est alignée sur celle du HP chargé par l'enceinte close,
- l'amortissement de ce résonateur est nul ($1/Q=0$).

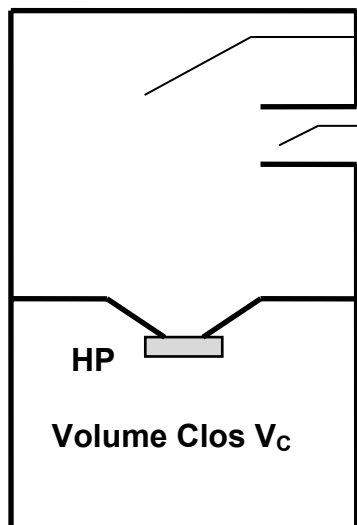
L'application directe de la formule générale proposée permettra de tenir compte de l'amortissement de l'enceinte et de procéder aux derniers ajustements.

Nous terminerons par quelques études de sensibilité montrant la variation de la courbe de réponse obtenue lorsque l'on fait varier les différents paramètres.

PRINCIPE

Le principe de l'enceinte à charge symétrique a été rappelé dans le N°40 de AFDERS Confidences: un résonateur de Helmholtz est excité par un haut-parleur, comme dans le cas du Bass-Reflex, à la différence que l'on n'utilise ici que l'émission de l'évent, le haut-parleur étant chargé, sur son autre face, par une charge close: figure 1.

Par rapport à ce que nous avons fait dans le N°41 pour l'enceinte Bass-Reflex, il y aura donc seulement deux différences:



Résonateur de Helmholtz, volume V_B
évent

1. Nous n'utiliserons que l'énergie rayonnée par l'évent,
2. Dans le calcul de la réponse du résonateur, nous tiendrons compte de l'influence de la réaction de l'air enfermé dans la charge close sur les paramètres du Haut-Parleur.

Figure 1

EFFET DE LA CHARGE CLOSE SUR LE HAUT-PARLEUR

Nous avons appris, à l'occasion de l'étude des enceintes closes, que:

- La fréquence de résonance f_s du HP augmente pour passer à la valeur f_c :

$$f_c = f_s \cdot \sqrt{1 + \frac{V_{AS}}{\gamma \cdot V_C}}$$

- . V_{AS} est le volume d'air équivalent à la raideur du HP,
- . γ (gamma) a été commenté dans le N°45, il représente l'augmentation de volume fictif de l'enceinte close V_C , dépendant du remplissage interne.

- Le coefficient de surtension Q_{TS} du HP augmente pour passer à la valeur Q_{TC} :

$$Q_{TC} = \frac{Q'_{TC} \cdot Q_A}{Q'_{TC} + Q_A} \quad \text{où:} \quad Q'_{TC} = Q_{TS} \cdot \sqrt{1 + \frac{V_{AS}}{\gamma \cdot V_C}}$$

- . Q_A est le coefficient de surtension, propre à l'enceinte close, commenté dans le N°45.

- Le volume d'air équivalent à la raideur du HP, plus air enfermé dans l'enceinte close est:

$$V_{AC} = V_{AS} \cdot \frac{\gamma \cdot V_C}{\gamma \cdot V_C + V_{AS}}$$

On observera que, si $1/Q_A = 0$ (hypothèse retenue pour l'établissement des abaques de la référence [1]), alors:

$$\frac{f_s}{Q_{TS}} = \frac{f_C}{Q_{TC}} \quad \text{et:} \quad V_{AS} \cdot Q_{TS}^2 = V_{AC} \cdot Q_{TC}^2$$

Ces relations permettent de procéder en deux temps pour la conception d'une enceinte à charge symétrique:

1. Calcul de la réponse du résonateur en supposant que le HP a les caractéristiques f_C , Q_{TC} , et V_{AC} ,
2. Calcul de la charge close, afin, partant des valeurs f_s , Q_{TS} , et V_{AS} du HP réel, d'obtenir les valeurs f_C , Q_{TC} , et V_{AC} recherchées.

CALCUL DE LA REPONSE DU RESONATEUR

Nous disposons des caractéristiques de notre « HP équivalent », soit V_{AC} , f_C et Q_{TC} . La réponse du résonateur excité par un tel HP est donnée par le mouvement (noté X_3 dans le N°41) de la masse m_4 d'air dans l'évent, mouvement dont l'expression a été développée dans le N°41 (janvier 1993) de AFDERS Confidences. Bien entendu, nous conservons les simplifications apportées page 10 de cet article, à savoir:

- amortissement réduit aux fuites de l'enceinte: C_3 , et C_4 sont pris égaux à 0,
- suppression du ressort K_4 , qui n'aurait d'intérêt que dans le cas de la simulation d'un HP passif (noter que l'on pourrait remplacer l'évent par un HP passif dans la conception d'une enceinte à charge symétrique).

Le schéma de l'enceinte et son circuit équivalent se réduisent alors à:

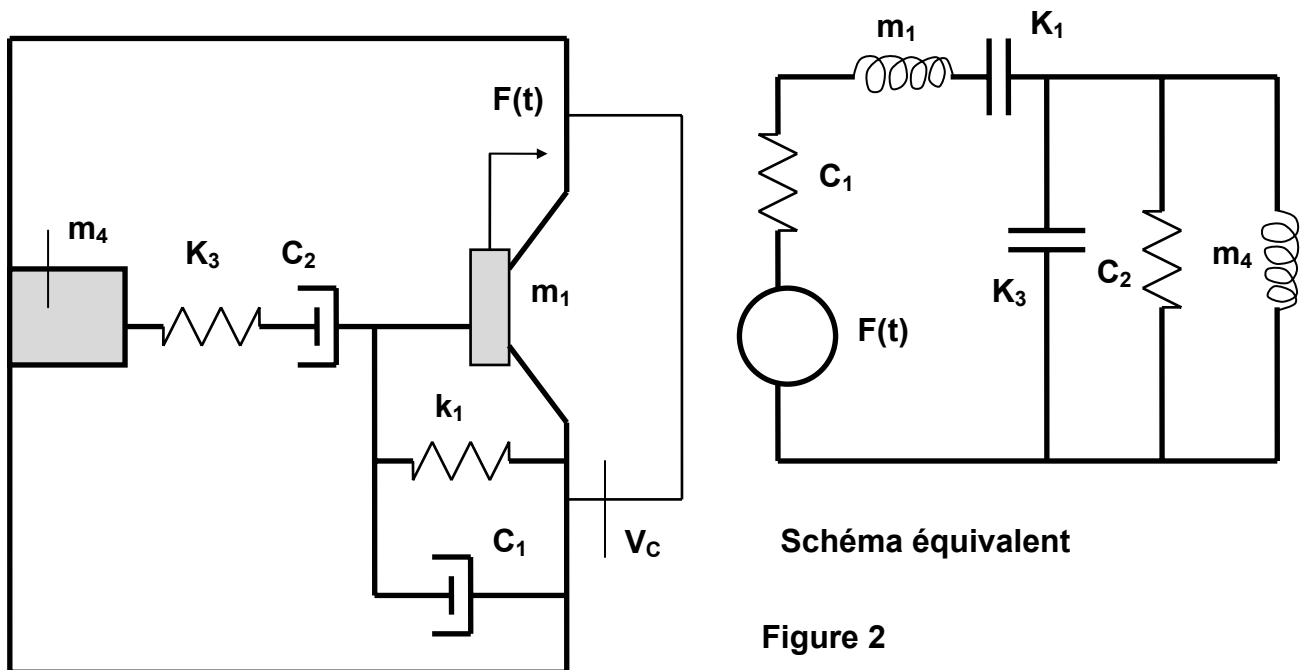


Figure 2

Nous n'allons pas reprendre à nouveau la démarche suivie dans le N°41. Reprenons-en simplement le résultat:

$$X_3 = \frac{-DB}{B^2E + AD^2 - CAE} F_o$$

où F_0 est la force appliquée au HP, et (compte-tenu des hypothèses simplificatrices précédentes):

$$A = -\omega^2 \cdot m_1 + i\omega(C_1 + C_2) + K_1$$

$$B = i\omega C_2$$

$$C = i\omega C_2 + K_3$$

$$D = K_3$$

$$E = -\omega^2 \cdot m_4 + K_3$$

Après développement, on obtient, pour la réponse R ($R = X_3$ dans ce cas de figure) du résonateur:

$$R = \frac{K_3 \cdot C_2 F(t)}{(i\omega)^4 C_2 m_1 m_4 + (i\omega)^3 (m_4 C_1 C_2 + K_3 m_1 m_4) + (i\omega)^2 [K_3 m_4 (C_1 + C_2) + m_4 C_2 K_1 + C_2 m_1 K_3] + i\omega [C_1 C_2 K_3 + K_1 K_3 m_4] + C_2 K_1 K_3}$$

Pour exprimer cette réponse en fonction des paramètres normalisés des Haut-Parleurs, nous utilisons les égalités suivantes, déjà rappelées dans le N°41, en nous souvenant que nous travaillons avec un « HP équivalent », d'où les indices « c »:

$$\frac{C_1}{m_1} = \frac{\omega_c}{Q_{TC}} \quad (\omega_c = \text{pulsation à la résonance du HP équivalent})$$

$$\omega_c = \sqrt{\frac{K_1}{m_1}} \quad (Q_{TC} = \text{coefficient de surtension du HP équivalent})$$

$$\frac{C_1}{K_1} = \frac{1}{\omega_c \cdot Q_{TC}}$$

De même (cf. N°41):

$$\omega_B = \sqrt{\frac{K_3}{m_4}} \quad (\omega_B = \text{pulsation à la résonance du résonateur})$$

$$\frac{C_2}{K_3} = \frac{Q_B}{\omega_B} \quad (Q_B = \text{coefficient de surtension du résonateur})$$

$$\frac{C_2}{m_4} = Q_B \cdot \omega_B \quad (\text{l'amortisseur est en série et non en parallèle})$$

$$\frac{K_3}{K_1} = \frac{V_{AC}}{V_B} \quad (V_B = \text{volume du résonateur})$$

Nous obtenons alors la relation suivante:

$$R = \frac{\frac{\omega_B^2}{m_1} \cdot F(t)}{(i\omega)^4 + (i\omega)^3 \left[\frac{\omega_c}{Q_{TC}} + \frac{\omega_B}{Q_B} \right] + (i\omega)^2 \left[\frac{\omega_B \omega_c}{Q_B Q_{TC}} + \frac{V_{AC} \cdot \omega_c^2}{V_B} + \omega_c^2 + \omega_B^2 \right] + i\omega \left[\frac{\omega_c \omega_B^2}{Q_{TC}} + \frac{\omega_B \omega_c^2}{Q_B} \right] + \omega_c^2 \omega_B^2}$$

Pour obtenir le niveau sonore, proportionnel à l'accélération de la masse d'air dans l'évent, il faut dériver deux fois par rapport au temps:

si $F = F_o \cdot e^{i\omega t}$, alors: $\ddot{F}(t) = (i\omega)^2 \cdot F_o (e^{i\omega t})$.

si nous notons: $2\pi \cdot i\omega = if$

$f_C = 2\pi\omega_C$ = fréquence de résonance du haut-parleur équivalent

$f_B = 2\pi\omega_B$ = fréquence d'accord du résonateur

nous obtenons:

$$\ddot{R} = \left[\frac{f_B^2 (if)^2}{(if)^4 + (if)^3 \left[\frac{f_C}{Q_{TC}} + \frac{f_B}{Q_B} \right] + (if)^2 \left[\frac{V_{AC} f_C^2}{V_B} + f_C^2 + \frac{f_B f_C}{Q_B Q_{TC}} + f_B^2 \right] + if \left[\frac{f_B f_C^2}{Q_B} + \frac{f_C f_B^2}{Q_{TC}} \right] + f_B^2 f_C^2} \right] \cdot \frac{F_o}{m_1} \cdot e^{i\omega t}$$

L'expression entre crochets est la fonction de transfert recherchée. Notez que, par rapport au Bass-Reflex, la seule différence (en dehors du fait que les paramètres apparaissant au dénominateur sont ici ceux du HP équivalent et non ceux du HP réel), c'est la présence du terme $f_B^2 (if)^2$ au lieu de $(if)^4$ au numérateur.

J'ai volontairement gardé l'expression if pour la variable, au lieu de S ou P comme on le trouve dans la littérature technique. C'est pour rappeler clairement que cette expression est un nombre complexe, dont on pourra déterminer:

- le module, qui donne le niveau sonore,
- l'argument, qui donne le déphasage.

Rappelons-le pour ceux qui ne nous lisent pas régulièrement: si Z est un nombre complexe:

$$Z = x + iy$$

- module A : $A = \sqrt{x^2 + y^2}$

- argument φ : $tg(\varphi) = \frac{y}{x}$

Il suffit donc, pour obtenir le niveau sonore, de séparer tous les termes où i apparaît (termes imaginaires), et ceux où i n'apparaît pas (termes réels), en se rappelant que:

- $i^2 = -1$
- if = imaginaire
- $(if)^2 = -f^2$ = réel
- $(if)^3 = -if^3$ = imaginaire
- $(if)^4 = f^4$ = réel

On trouve alors pour le module: formule (1):

$$A^2(f) = \frac{f_B^4 \cdot f^4}{[f^4 - f^2 \left(\frac{V_{AC} f_C^2}{V_B} + f_C^2 + \frac{f_B f_C}{Q_B Q_{TC}} + f_B^2 \right) + f_B^2 f_C^2]^2 + [f^3 \left(\frac{f_C}{Q_{TC}} + \frac{f_B}{Q_B} \right) - f \left(\frac{f_B f_C^2}{Q_B} + \frac{f_C f_B^2}{Q_{TC}} \right)]^2}$$

Si nous avons pris $A^2(f)$ plutôt que $A(f)$, c'est pour éviter de faire apparaître une grande racine au dénominateur, et aussi parce que l'on a l'habitude d'exprimer le niveau sonore en décibels:

$$\text{Niveau en dB} = 20 \log A = 10 \log A^2.$$

ce qui évitera des calculs inutiles à notre ordinateur.

UNE PREMIERE APPLICATION

Avant d'aller plus loin, et afin de vérifier que nous sommes bien sur la bonne voie, appliquons notre formule à l'exemple développé référence [1]:

HP: 8N401 Focal

$f_s = 26 \text{ Hz}$

$Q_{TS} = 0,41$

$V_{AS} = 103 \text{ l}$

$V_C = 38 \text{ l}$

On en déduit, en supposant la charge close non amortie ($1/Q_a = 0$, $\gamma = 1$):

$$f_C = f_s \sqrt{1 + \frac{V_{AS}}{V_C}} = 50,08 \text{ Hz}$$

$$Q_{TC} = Q_{TS} \sqrt{1 + \frac{V_{AS}}{V_C}} = 0,79$$

$$V_{AC} = V_{AS} \frac{V_C}{V_C + V_{AS}} = 27,76 \text{ l}$$

Calculons $10 \log A^2$: figure 3

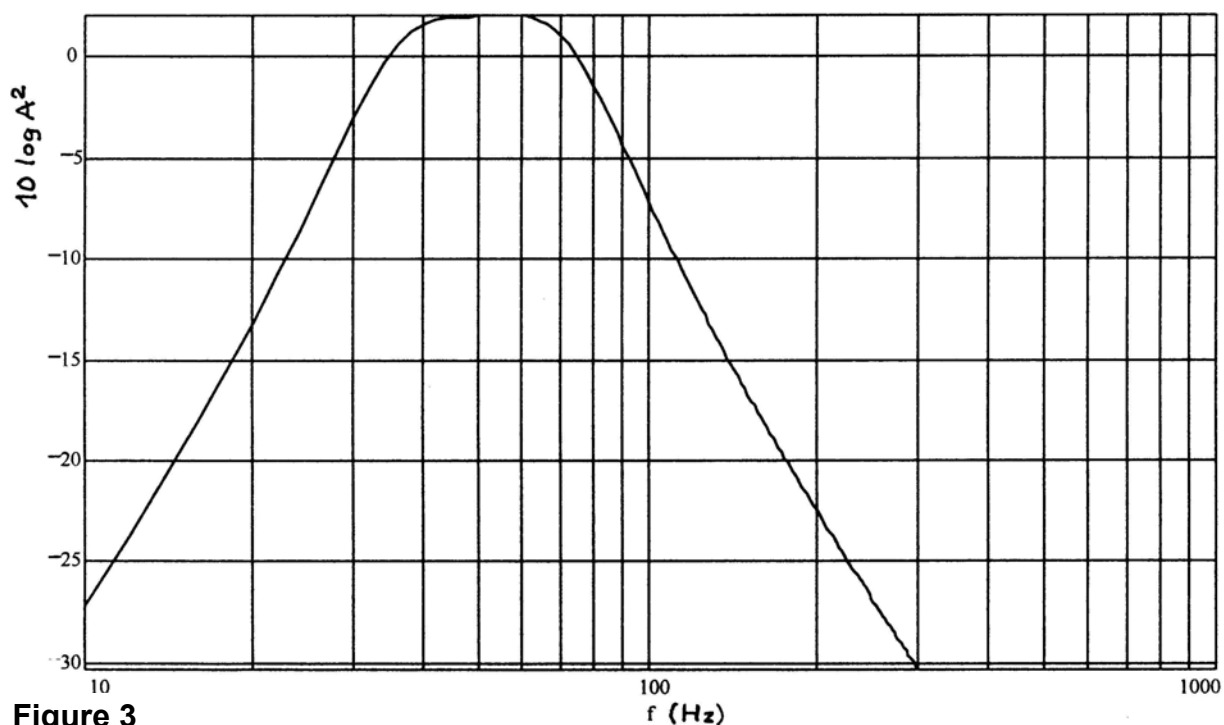


Figure 3

Cette courbe dépasse le rendement de référence de 1,9 dB, ce qui est strictement conforme à l'abaque correspondant à un Q_T de 0,79 de la figure 8 de la référence [1]. Vérifions que nous obtenons également les mêmes résultats avec le logiciel Boxcalc: figure 4:

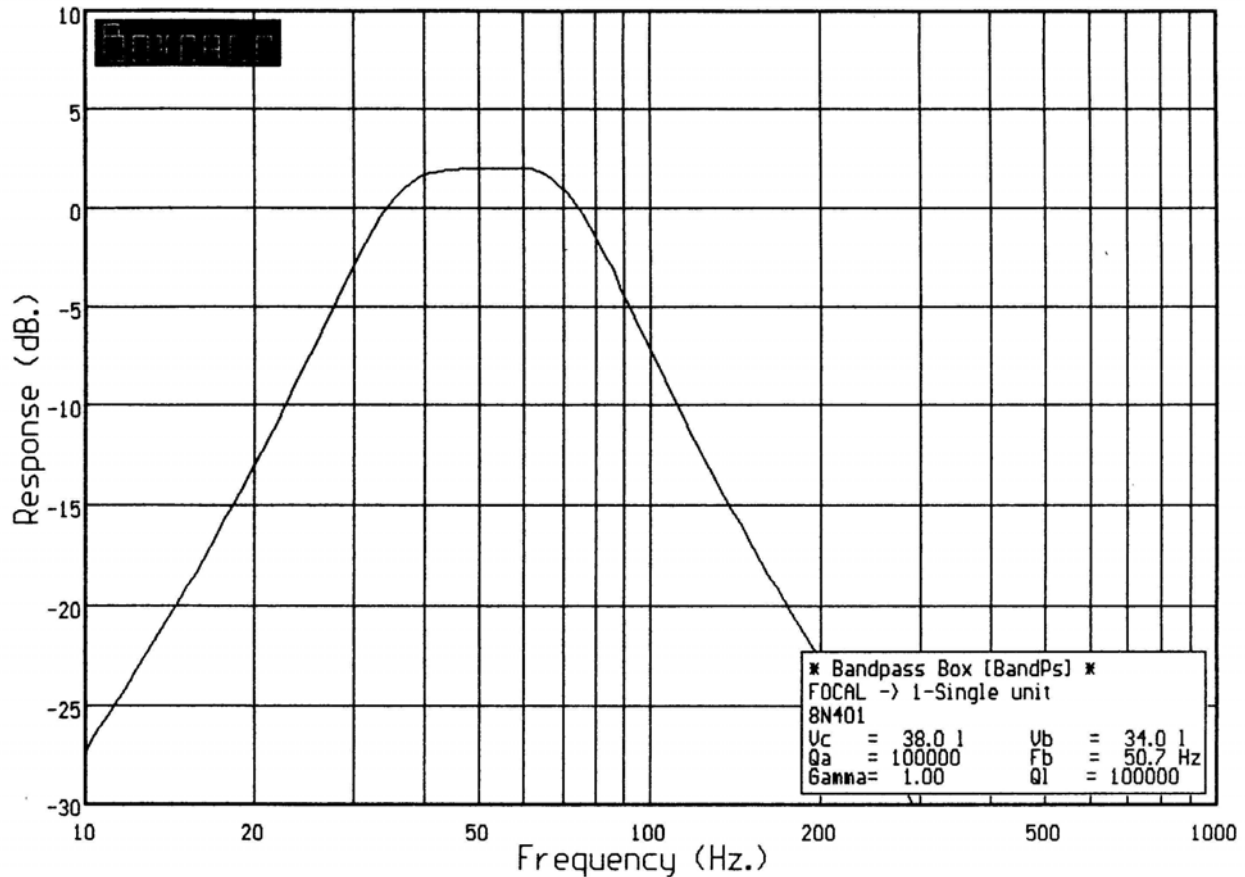


Figure 4

Cette fonction de transfert doit bien entendu être appliquée au rendement de référence du HP, dont nous avons vu dans le N°33, qu'il était égal à:

$$\eta_o(dB) = 112 + 10 \cdot \log \frac{4\pi^2 f_s^3 V_{AS}}{c^3 Q_{ES}}$$

où: c = vitesse de propagation des ondes acoustiques = 340 m/s dans l'air
 Q_{ES} = coefficient de surtension (électrique) du HP = 0,41 (confondu avec Q_{TS} en l'absence d'information)
 V_{AS} = exprimé en m^3 dans la formule

On trouve: $\eta_o = 88,47$ dB. En ajoutant + 1,9 dB correspondant au dépassement du niveau de référence obtenu précédemment, on obtient un niveau max d'environ 90,4 dB, qui correspond bien au niveau obtenu avec Boxcalc: figure 5:

Cette courbe a la même allure que celle présentée figure 9 de la référence [1] en l'absence d'amortissement. Les auteurs ne donnent aucune abaque pour tenir compte de l'amortissement, pour notre part, nous utiliserons notre formule générale (1) ci-dessus, ou encore le logiciel Boxcalc. A titre d'exemple, la figure 6 prend en compte une valeur $Q_A = 10$ pour l'enceinte close et une valeur $Q_B = 7$ pour l'enceinte Bass-Reflex. La baisse de niveau de l'ordre de 2 dB est cohérente avec celle de la référence [1].

Ce qui n'est pas tout à fait cohérent, toutefois, c'est le niveau qui diffère d'environ 4 dB (84 dB au lieu de 88 dB pour le niveau de référence) de nos calculs. Cet écart se retrouve si l'on modélise les enceintes closes et Bass-Reflex de la figure 10 de la référence [1]. Sous réserve de vérification, nous confirmons la validité de nos propres résultats.

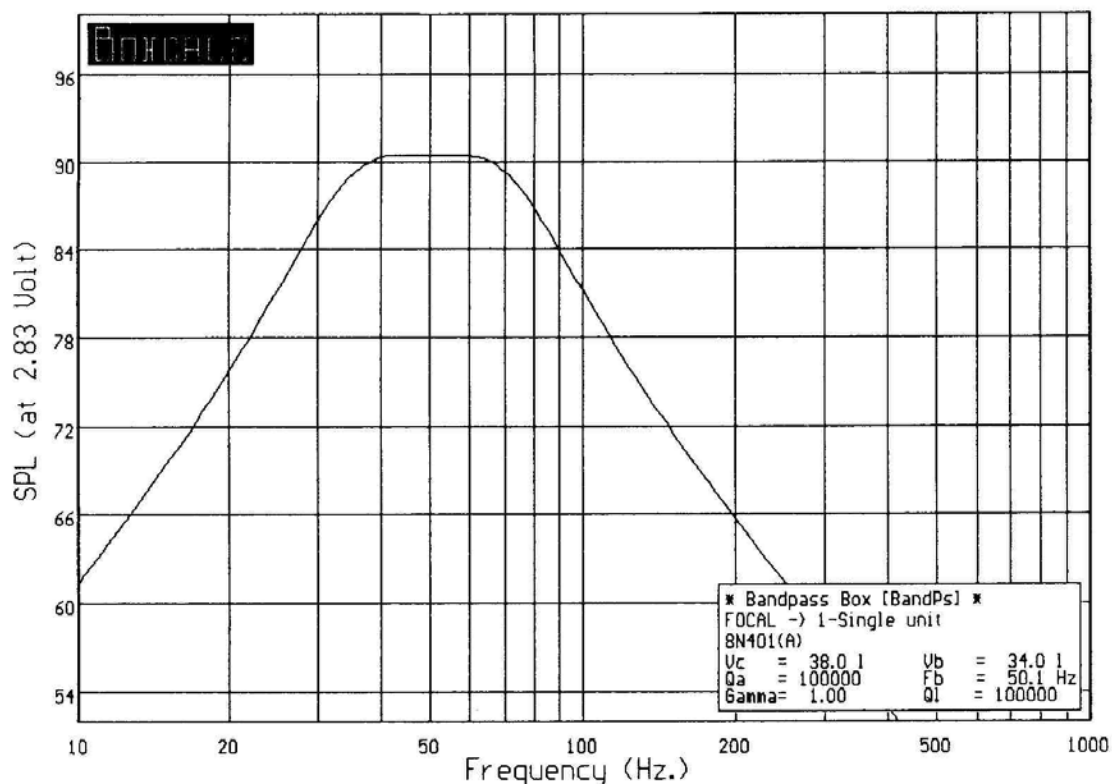


Figure 5

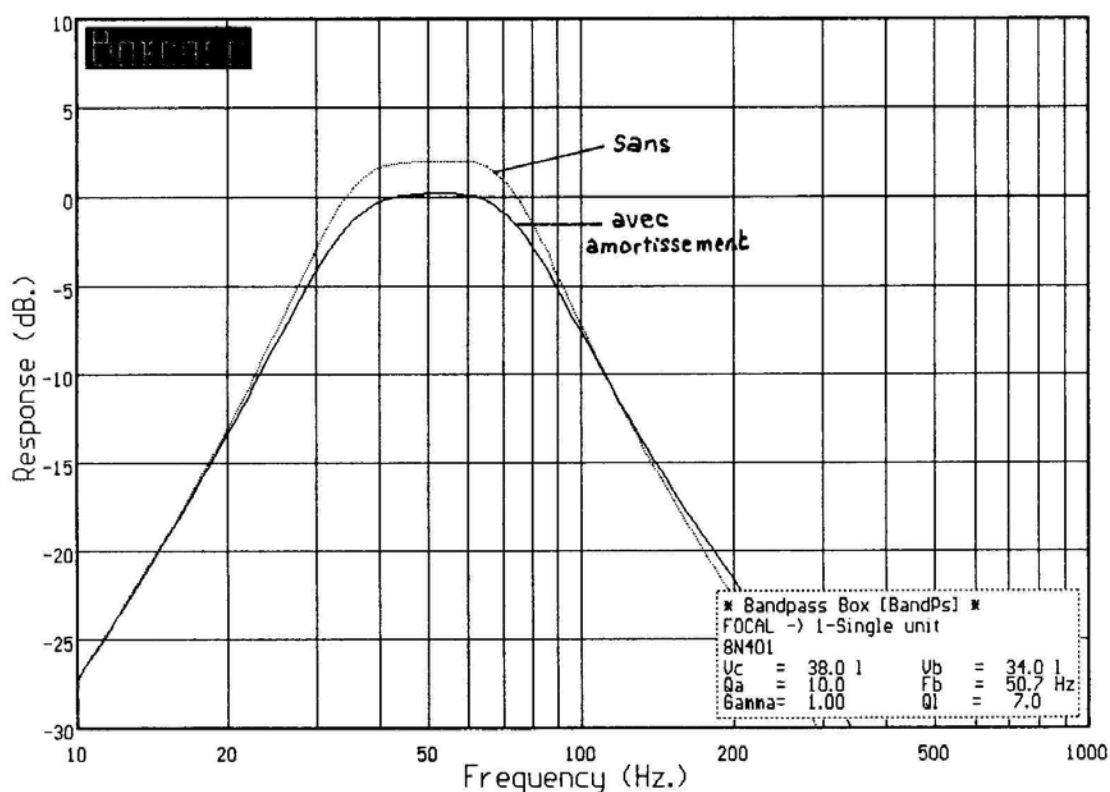


Figure 6

APPROCHE SIMPLIFIEE D'OPTIMISATION

Pour concevoir un caisson de grave en charge symétrique, vous pouvez procéder directement, par essais et erreurs, en prenant l'expression (1) et divers HP et volumes de charge. Ca risque de prendre du temps.

Vous pouvez aussi retenir l'approche de l'article de l'Audiophile (réf. [1]) pour dégrossir les premiers choix et réserver l'application de la formule générale à la phase d'optimisation. Les abaques de la référence [1] ont été établies en faisant deux hypothèses simplificatrices:

- Amortissement nul: tous les termes en $1/Q_B$ disparaissent.
- Accord du résonateur sur la fréquence de résonance du HP chargé par le volume clos V_C , c'est à dire: $f_B = f_C$.

La fonction de transfert (1) se réduit alors à:

$$A^2(f) = \frac{f_C^4 \cdot f^4}{[f^4 - f^2 f_C^2 (\frac{V_{AC}}{V_B} + 2) + f_C^4]^2 + [f^3 \frac{f_C}{Q_{TC}} - f \frac{f_C^3}{Q_{TC}}]^2}$$

En normalisant par rapport à la fréquence d'accord f_C (il suffit de diviser numérateur et dénominateur par f_C^8), on obtient:

$$A^2(f) = \frac{(\frac{f}{f_C})^4}{[(\frac{f}{f_C})^4 - (\frac{f}{f_C})^2 (\frac{V_{AC}}{V_B} + 2) + 1]^2 + [\frac{1}{Q_{TC}} ((\frac{f}{f_C})^3 - \frac{f}{f_C})]^2} \quad (2)$$

Afin de faire apparaître le terme d'ondulation s utilisé référence [1], il suffit d'exprimer $20 \log$ du module $H(f)$ de la fonction de transfert générale d'un filtre passe-bande du quatrième ordre: prendre l'expression générale rappelée p. 50 de la réf. [1], appliquer la démarche donnée précédemment. On trouve alors l'expression (3) suivante:

$$H^2(f) = \frac{(\frac{f}{f_C})^4}{[(\frac{f}{f_C})^4 - (\frac{f}{f_C})^2 (B^2 + 2) + 1]^2 + [2sB((\frac{f}{f_C})^3 - \frac{f}{f_C})]^2}, \text{ à une constante près.} \quad (3)$$

En identifiant terme à terme les expressions (2) et (3), on en déduit immédiatement:

$$B = \sqrt{\frac{V_{AC}}{V_B}} \quad (4)$$

$$\text{et: } s = \frac{1}{2Q_{TC}} \sqrt{\frac{V_B}{V_{AC}}}$$

s caractérise l'ondulation dans la bande passante: si ε est l'amplitude de l'ondulation, ε peut être obtenu à partir de s à l'aide du tableau ci-après:

s	0,4	0,5	0,6	0,7	>0,7
ε (dB)	2,7	1,25	0,35	0	0

Une illustration des courbes ainsi obtenues est donnée figure 7 ($s = 0,5$ et $0,7$, $B = 2$).

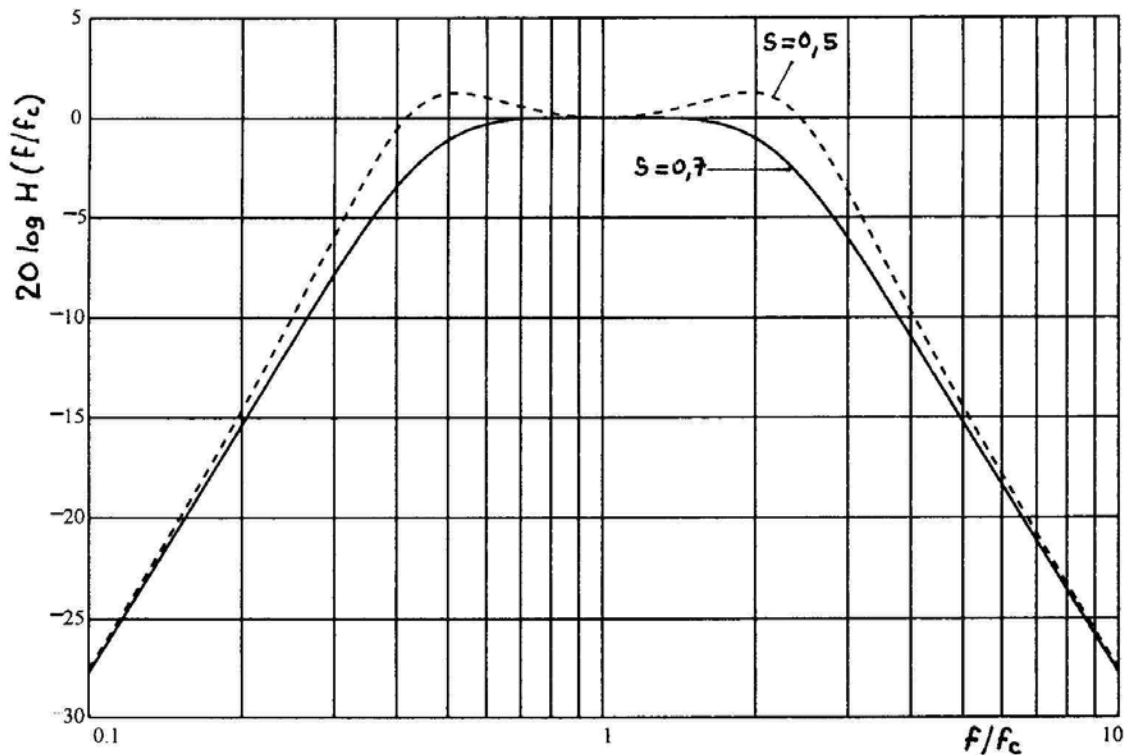


Figure 7

On voit clairement, d'après la relation (4), que le volume V_B ne dépend que de Q_{TC} , de V_{AC} , et de la valeur admissible pour l'ondulation s .

Les paramètres Q_{TC} et V_{AC} sont ceux du « HP équivalent », qui n'est pas connu tant que le volume V_C n'est pas défini. Afin de pouvoir raisonner directement sur les paramètres du HP réel, les auteurs observent, ce que nous avons vu page 5, que:

$$\frac{Q_{TC}}{f_c} = \frac{Q_{TS}}{f_s}$$

Ils font donc apparaître le rapport Q_{TC}/f_c dans leurs abaques, ce qui permet de les graduer directement en fonction de Q_{TS}/f_s . Pour cela, reprenons l'expression (2) et faisons apparaître le paramètre s , compte-tenu de (4), puis multiplions numérateur et dénominateur par Q_{TC}^8 : on obtient, en posant $x = (f/f_c)Q_{TC}$:

$$A^2(x) = \frac{x^4 \cdot Q_{TC}^4}{[x^4 - x^2[(\frac{1}{2s})^2 + 2Q_{TC}^2] + Q_{TC}^4]^2 + [x^3 - xQ_{TC}^2]^2} \quad (5)$$

Il suffit de tracer les courbes $10 \log A^2(x)$ pour différentes valeurs de s et de Q_{TC} pour obtenir les réseaux de courbes des figures 6 à 8 de l'article de l'Audiophile (réf. [1]). Ces réseaux ont été établis pour des valeurs de s égales à 0,5; 0,6; et 0,7. Pour faire bonne mesure, notre ordinateur qui ne recule devant aucun effort les a tracées pour:

$$s = 0,5 - 0,6 - 0,7 - 0,8 - 1,0 - 1,2 - 1,5 - 2,0$$

et pour des valeurs de Q_{TC} égales à (de bas en haut):

$$Q_{TC} = 0,40 - 0,45 - 0,50 - 0,55 - 0,63 - 0,71 - 0,79 - 0,89 - 1,00 - 1,12 - 1,26.$$

Ces réseaux de courbes sont données ci-après, figures 8 à 15.

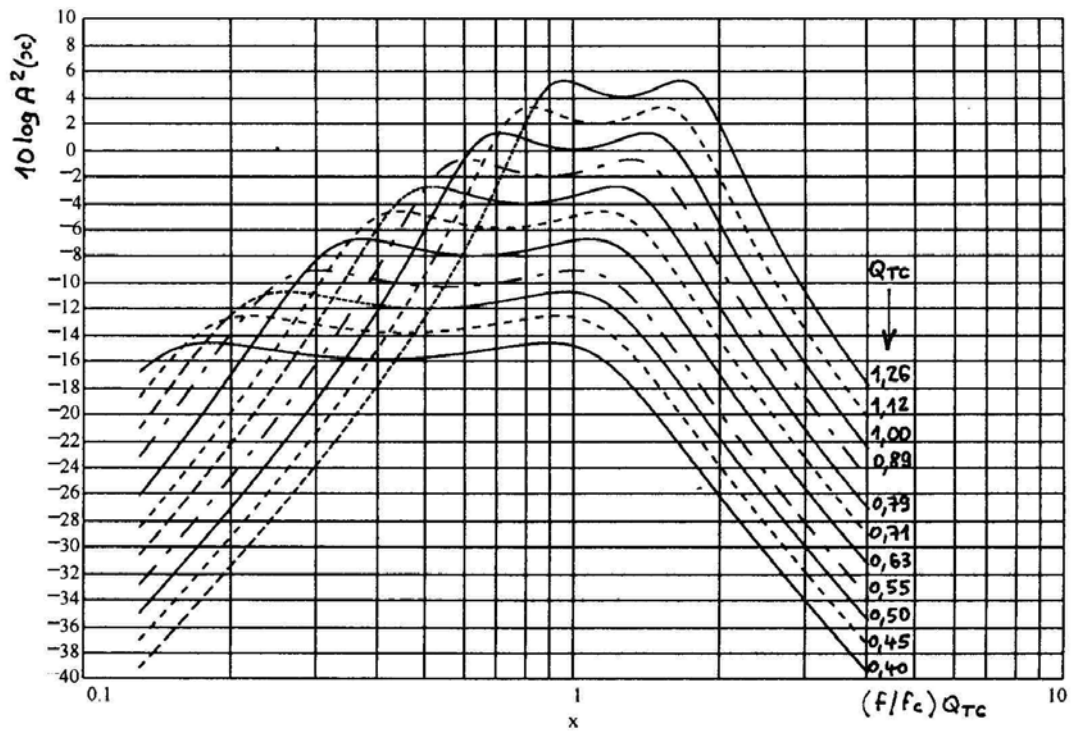


Figure 8: $s = 0,5$

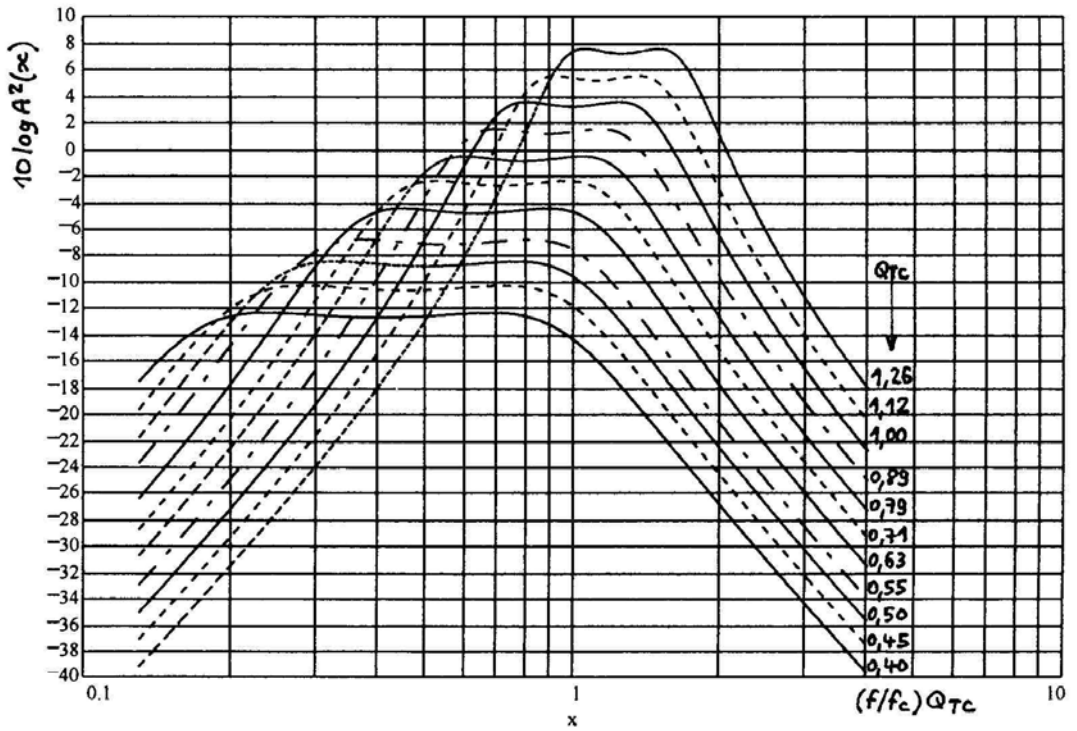


Figure 9: $s = 0,6$

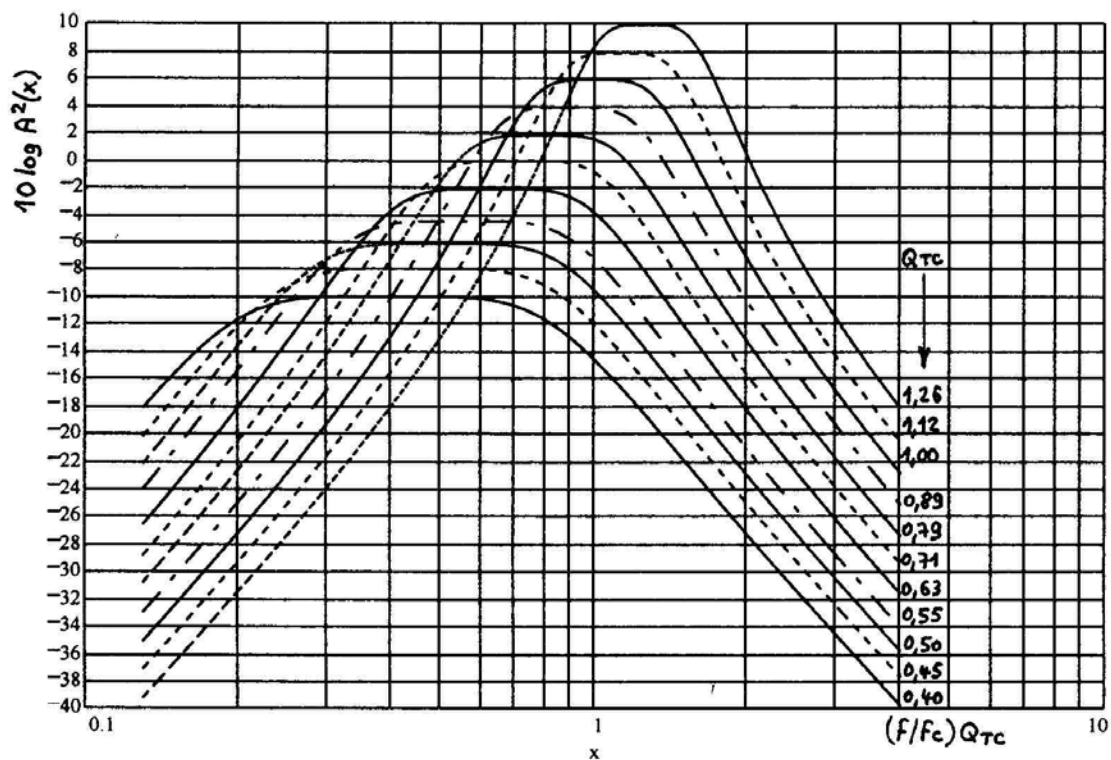


Figure 10: $s = 0,7$

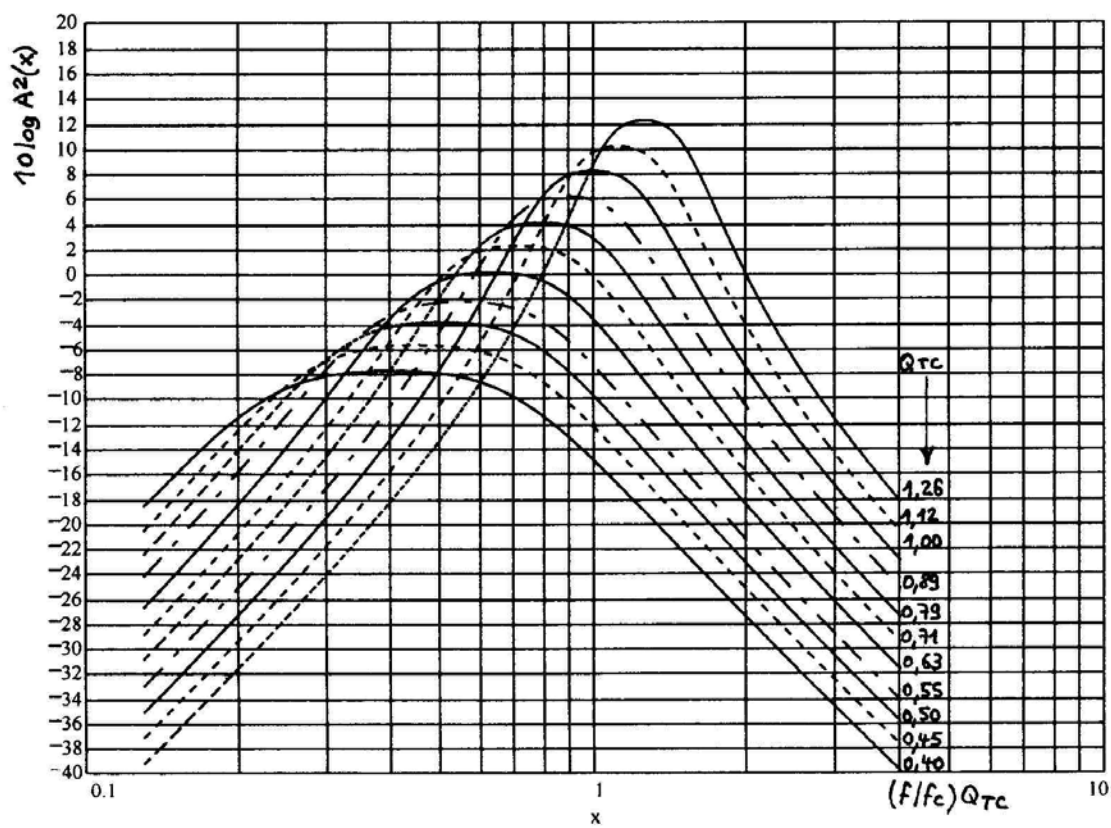
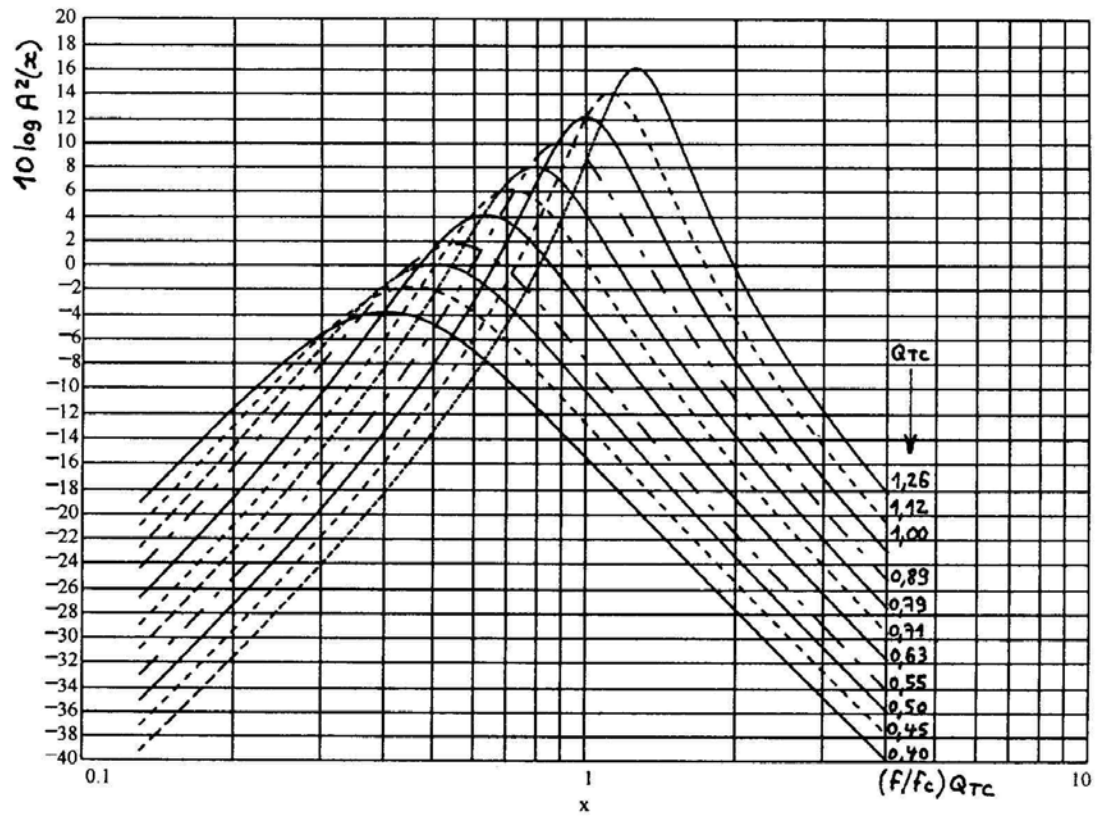
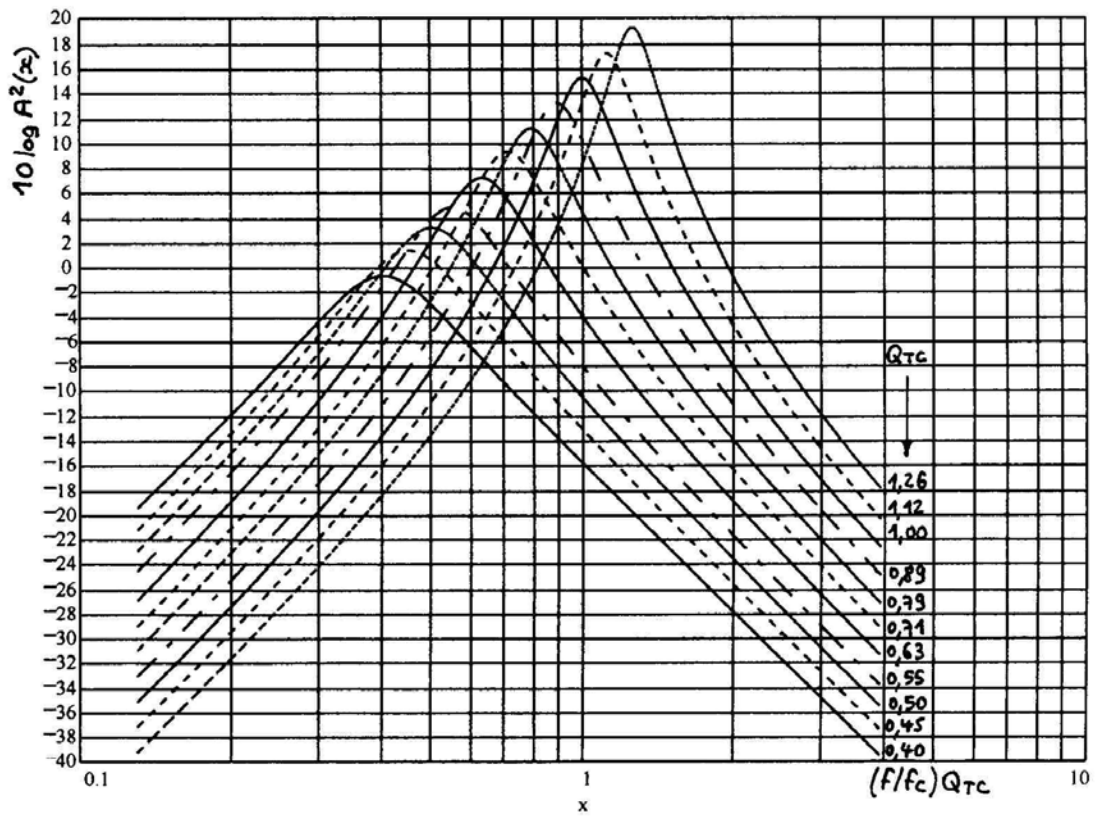


Figure 11: $s = 0,8$

Figure 12: $s = 1,0$ Figure 13: $s = 1,2$

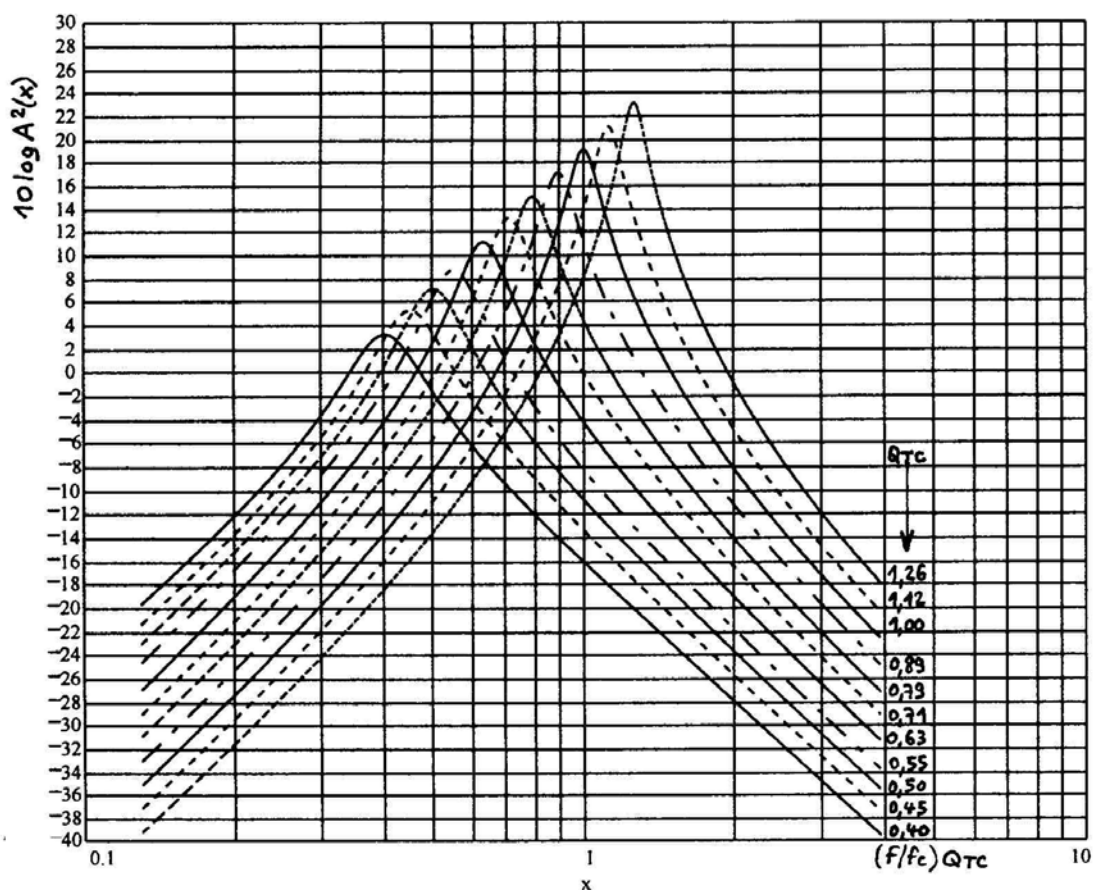


Figure 14: $s = 1,5$

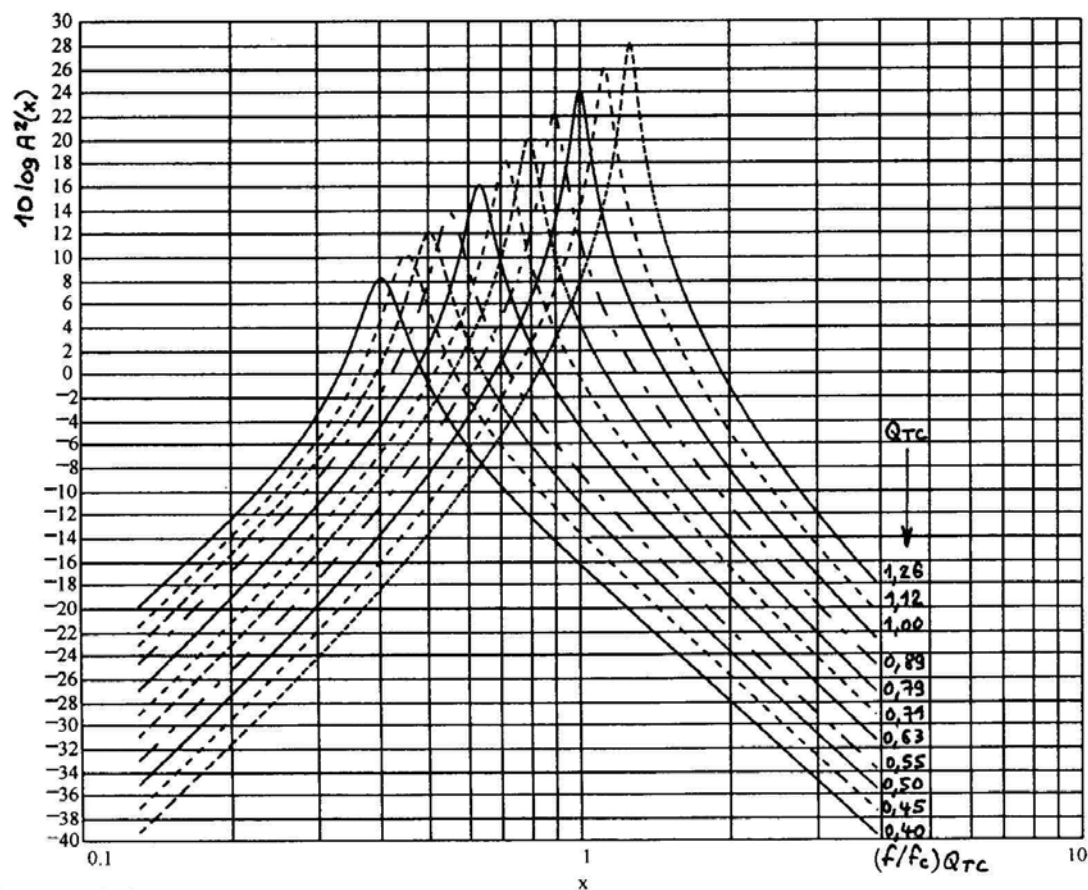


Figure 15: $s = 2,0$

MODE D'EMPLOI

Nous reprendrons ci-après la logique de la référence [1]:

- **Pour un HP choisi** (le 20 SCA 8 du caisson de grave de l'enceinte Davis Kristel, par exemple), relever les caractéristiques suivantes dans la notice du constructeur:

- $f_S = 41,4$ Hz
- $Q_{TS} = 0,32$ (en tenant compte d'une résistance de 0,5 ohms en série avec le HP)

Déterminez la fréquence normalisée: $f_S/Q_{TS} = f_C/Q_{TC} = 129,4$ Hz. Comme ça, à première vue, ce HP a l'air assez nerveux.

- $V_{AS} = 64,57$ l.

Si nous souhaitons modéliser un montage en Push-Pull comme dans la Kristel, nous devons diviser le V_{AS} par 2, soit: 32,3 litres.

- **Le volume avant**, avons-nous dit, est directement lié à la valeur de s souhaitée, et à la valeur du produit $V_{AC} \cdot Q_{TC}^2$, qui est égal à $V_{AS} \cdot Q_{TS}^2$ (cf. page 5). D'après (4):

$$V_B = 4 s^2 V_{AS} Q_{TS}^2$$

Selon cette relation, la valeur de s retenue pour le caisson Kristel (volume $V_B = 60$ l) est égal à... 2,13, soit une valeur totalement en dehors des abaques de la référence [1], qui justifie que nous ayons étendu ci-dessus la plage des valeurs de s considérées.

- **La fréquence de coupure haute** souhaitée doit ensuite être choisie. Ici, compte-tenu du fait que le médium 20 TK8 coupe à environ 60 Hz lorsque chargé par un volume de 40 l, cette fréquence peut être choisie voisine de 60 Hz. Soit f_{CH} cette valeur. On en déduit le rapport $(f_{CH}/f_S)Q_{TS} = 0,464$.

- **Déterminer sur le réseau de courbes paramétrées en Q_{TC}** correspondant à une valeur de $s = 2$ (ne chipotons pas sur le 0,13), la courbe possédant une coupure haute (à - 3 dB) pour une valeur $x = (f_{CH}/f_S)Q_{TS} = 0,464$. A première vue, il s'agit de la plus basse, correspondant à un $Q_{TC} = 0,40$ (d'où ici encore l'intérêt d'avoir étendu la plage couverte par ces abaques). La fréquence de coupure basse correspond à:

$$(f_{CB}/f_S)Q_{TS} = 0,35, \text{ soit une valeur } f_{CB} \text{ voisine de 45 Hz.}$$

Noter que les coupures retenues dans cet exemple sont plus proches de - 6 dB que de -3dB. Nous anticipons sur les effets de l'amortissement (cf. figure 16).

- **Calculer le volume arrière:**

$$V_C = \frac{V_{AS}}{\left(\frac{Q_{TC}}{Q_{TS}}\right)^2 - 1} = 57 \text{ litres, soit environ 60 l,}$$

volume effectif de la charge close du caisson de la Kristel.

- **Il reste à dimensionner l'évent.** L'évent est dimensionné selon la règle classique applicable également aux enceintes Bass-Reflex, en alignant l'accord du Bass-Reflex sur la fréquence de résonance du HP monté dans l'enceinte close, égale ici à:

$$f_c = f_s \sqrt{1 + \frac{V_{AS}}{V_C}} = 51,5 \text{ Hz} \quad (\text{si l'on considère un volume clos de 60 litres}).$$

La fréquence de résonance d'un résonateur de Helmholtz se calcule par la relation:

$$f_c = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_V}{V_B \cdot L_V}}$$

où: c = vitesse de propagation du son dans l'air: 340 m/s

S_V = surface de l'évent = $\pi \cdot D^2/4$

L_V = longueur de l'évent, à calculer

V_B = volume du résonateur

De la formule précédente, on déduit:

$$L_V = \frac{c^2 S_V}{4\pi^2 \cdot f_c^2 V_B}, \quad \text{soit:} \quad L_V = \frac{2928 \cdot S_V}{f_c^2 \cdot V_B},$$

que l'on pourra, comme dans la référence [1], arrondir à: $L_V = \frac{3000 \cdot S_V}{f_c^2 \cdot V_B}.$

Cette formule est valable à condition que toutes les grandeurs soient exprimées dans des unités homogènes: m, m², m³.

Selon cette formule, on trouverait, pour un diamètre de 0,1 m, une longueur $L_V = 0,148$ m.

Il convient d'appliquer à cette longueur une correction d'extrémité représentant le fait qu'un certain volume d'air est mis en mouvement au voisinage de l'évent, de part et d'autre de celui-ci, ce qui conduit à une longueur effective plus importante que la longueur physique. Pour que la longueur effective soit égale à la longueur L_V calculée, il faut donc réaliser un événement plus court.

Cette correction dépend des conditions d'extrémité, et l'on trouve un peu de tout dans les articles techniques. Dans le cas classique d'un événement débouchant d'un côté sur la face avant d'une enceinte, on pourra retenir la formule suivante:

$$\text{longueur physique à réaliser} = L_V - 0,825 \sqrt{S_V}$$

Si l'on fait le calcul pour le caisson Kristel, on trouve une longueur corrigée égale à 0,075 m (valeur retenue par le constructeur: 0,075 m, valeur proposée par le logiciel Boxcalc: 0,074 m pour cet accord).

Au terme de ces différentes étapes, nous avons terminé notre conception. Nous notons sur cet exemple que le choix effectué par Davis se situe en dehors des réseaux de courbes publiés jusqu'ici. Les HP retenus sont des HP très nerveux et la bande passante couverte est assez limitée. Il s'agit essentiellement d'un renforcement de la réponse dans le grave en appui du médium 20 TK8, qui réalise l'essentiel du travail.

EFFET DES DIFFERENTS PARAMETRES

Nous terminerons cet article par quelques illustrations pratiques:

- **Effet de l'amortissement:**

Les règles ci-dessus, qui permettent une première approche, ne permettent pas la prise en compte simple de l'amortissement introduit dans la charge close ou le résonateur. On voit sur la figure 16 l'effet significatif de cet amortissement, simulé avec le logiciel Boxcalc sans amortissement, et avec l'hypothèses d'un $Q_a = 5$ (charge close), et d'un $Q_b = 7$ (résonateur), qui constituent les paramètres par défaut du logiciel Boxcalc.. La réponse est plus régulière avec amortissement, et le niveau maxi est cohérent avec la réponse dans le grave du 20 TK8 monté en Bass-Reflex.

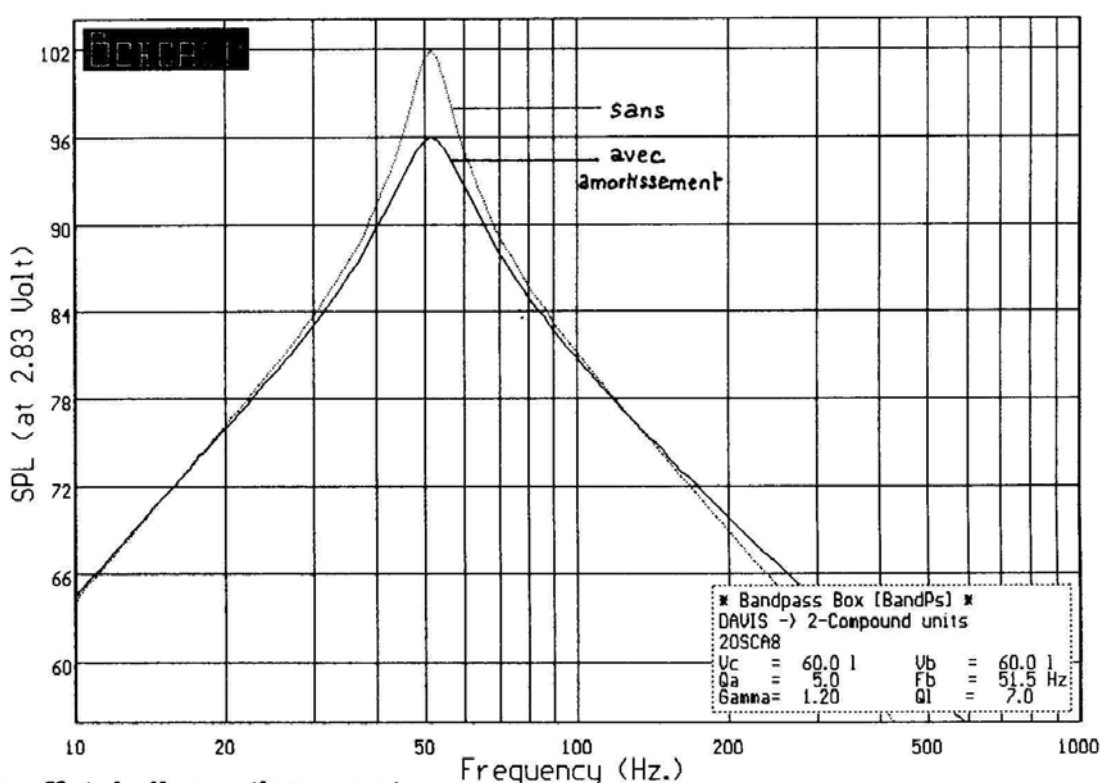


Figure 16: effet de l'amortissement

- **Effet de l'association des HP**

Je dois à la vérité de dire que le logiciel Boxcalc n'apprécie pas beaucoup de descendre (pour la simulation des charges symétriques) à des valeurs de Q_{TC} inférieures à 0,5, particulièrement si l'on essaie d'accorder le résonateur en dessous de f_c . On risque alors de se retrouver sans crier gare au niveau de l'invite du DOS, avec un « Runtime error » sans appel. Je n'en vois personnellement pas la raison (bug?), la formule (1) ne posant aucun problème quelque soient les choix effectués.

Pour cette raison, et afin de ne pas faire « disjoncter » notre logiciel, nous allons à présent choisir pour nos illustrations des configurations qui ne nous font pas rentrer dans la zone conduisant simultanément à $f_B < f_c$ et $Q_{TC} < 0,5$. Ceci expliquera certains choix de volumes de charges ou de fréquences d'accord. La figure 17 illustre la réponse obtenue pour un HP 20 SC8A seul (1S), un montage Push-Pull (2C), et un montage des HP en parallèle

(cas des bobines en parallèle (2P) et en série (2S)). Ces réponses sont obtenues pour un même volume de charge et une même fréquence d'accord du résonateur (ici $f_B = 57$ Hz).

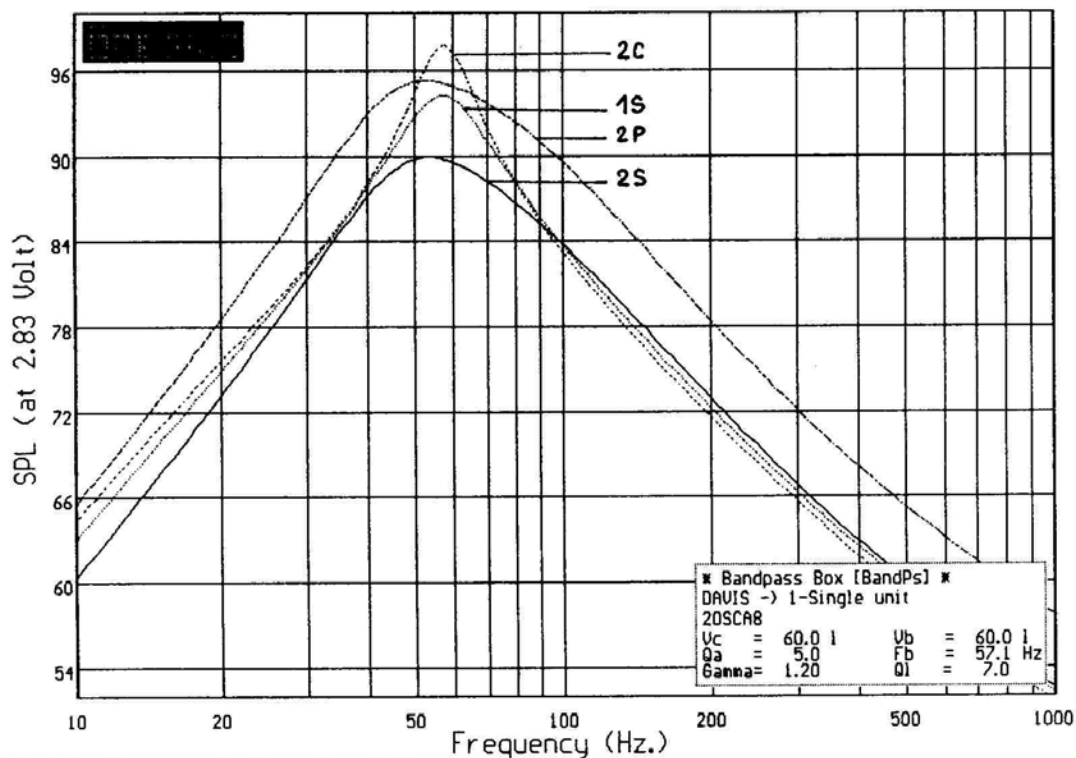


Figure 17: Effet de l'association des HP

- **Effet du volume arrière:** La figure 18 montre que cet effet n'est pas critique (cas du HP 20 SCA8 seul, $V_B = 30$ l, $f_B = 70$ Hz, V_C variant de 20 à 50 litres)

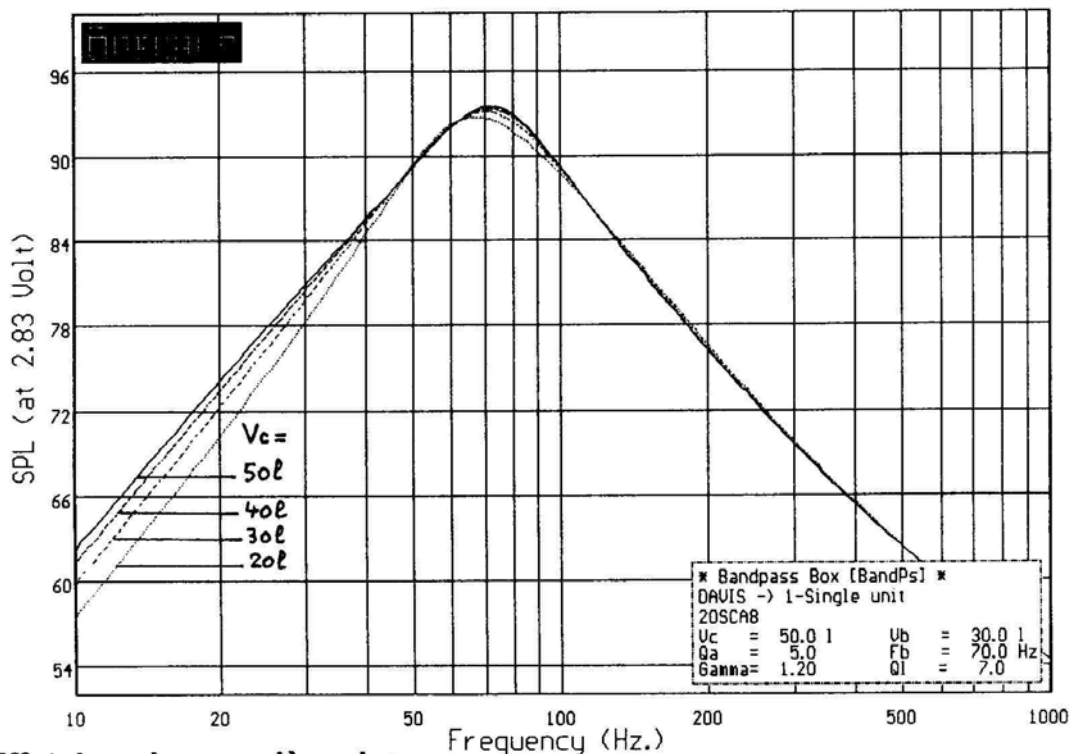


Figure 18: Effet du volume arrière clos

• Effet du volume avant

L'effet du volume avant est plus significatif. Si la chute de niveau loin de la fréquence d'accord est voisine, une réduction du volume réduit le niveau maximal, mais élargi la bande passante utile. La figure 19 illustre le cas du HP 20 SCA 8 seul monté en charge close de 48 l, avec $f_B = 60$ Hz, et un volume du résonateur variant de 48 l à... 6 litres! Evidemment un accord aussi bas dans une charge de volume aussi faible n'est pas très raisonnable.

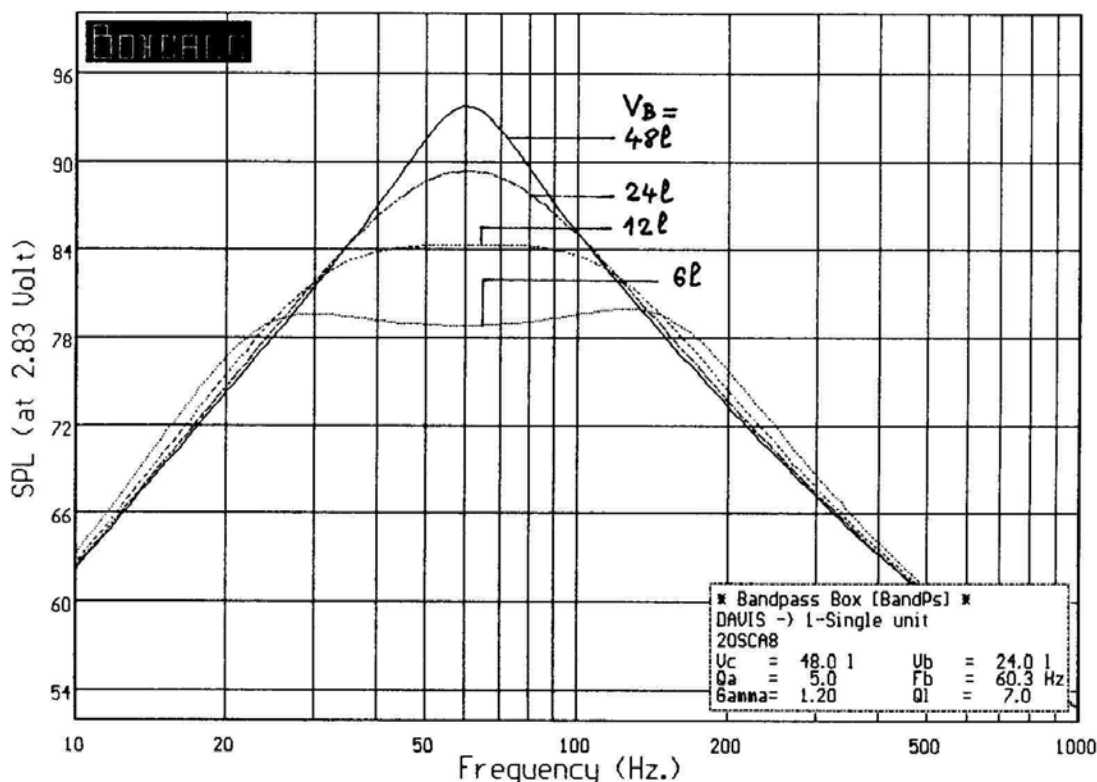


Figure 19: Effet du volume avant

• Effet de la fréquence d'accord du résonateur:

Sur la figure 20, on observe qu'un abaissement de la fréquence d'accord du résonateur, tout autre paramètre demeurant constant ($V_C = 26$ litres, $V_B = 30$ litres) conduit à une baisse sensible du niveau. Si l'on va trop loin, on observe les effets d'un désaccord complet entre la fréquence de résonance du HP et celle du résonateur, qui se traduisent par une courbe totalement dissymétrique.

On pourrait compenser cette baisse de niveau par une mise en parallèle des deux HP 20 SCA8: Cette mise en parallèle fait en effet gagner 6 dB, que l'on peut perdre en décalant la fréquence d'accord du résonateur vers le bas. La courbe est un peu dissymétrique, mais on atteint tout de même 90 dB/1W/1m à 30 Hz avec ce montage: figure 21. Sur cette figure, V_C et V_B sont égaux à 60 litres, comme pour la figure 17, mais ici les HP sont montés en parallèle (V_{AS} doublé et non divisé par deux comme dans le cas du montage Push-Pull), et la fréquence d'accord varie de 60 Hz à 45 Hz.

La dissymétrie est due à deux causes: la fréquence d'accord, et le montage des HP en parallèle qui, en doublant le V_{AS} décale la fréquence de résonance f_C du HP vers les

hautes fréquences, à volume de charge donné (cf. page 4). Ici, f_c est égal à 73,5 Hz, soit une différence de presque 30 Hz avec l'accord du résonateur lorsque ce dernier est égal à 45 Hz. Il en résulte également une baisse de niveau plus faible au dessus de 60 Hz, qui peut interférer avec la réponse dans le bas médium du 20 TK8. Une solution à mettre à l'essai?

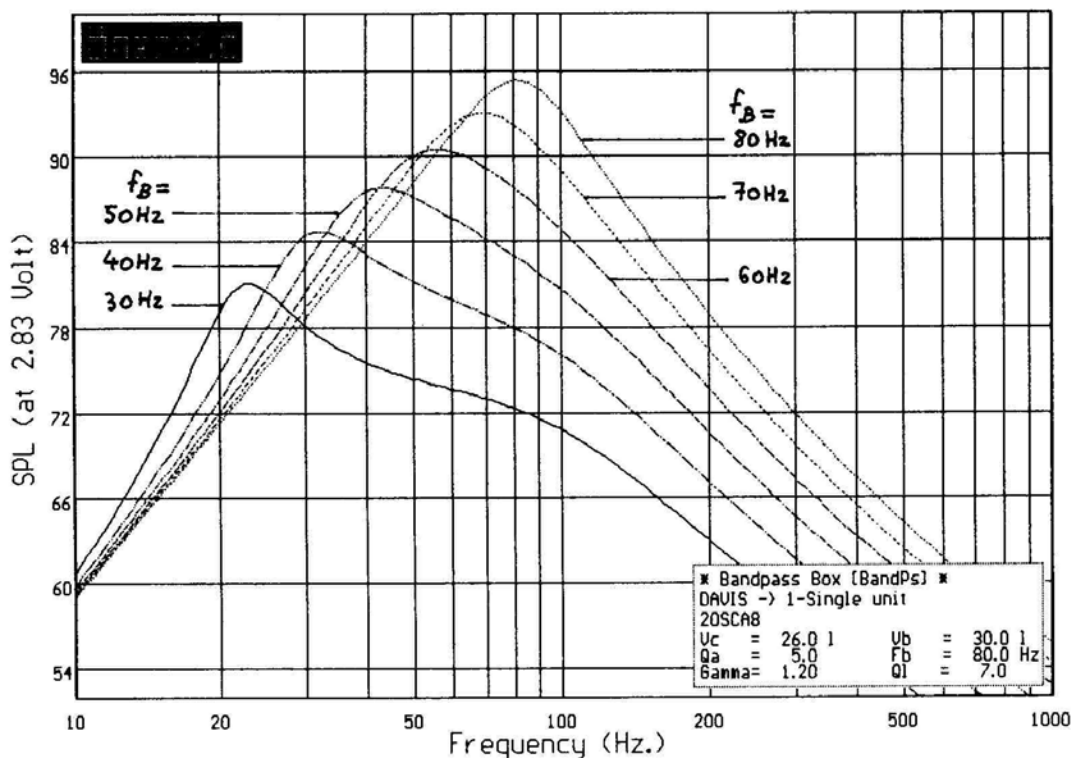


Figure 20: Effet de la fréquence d'accord du résonateur

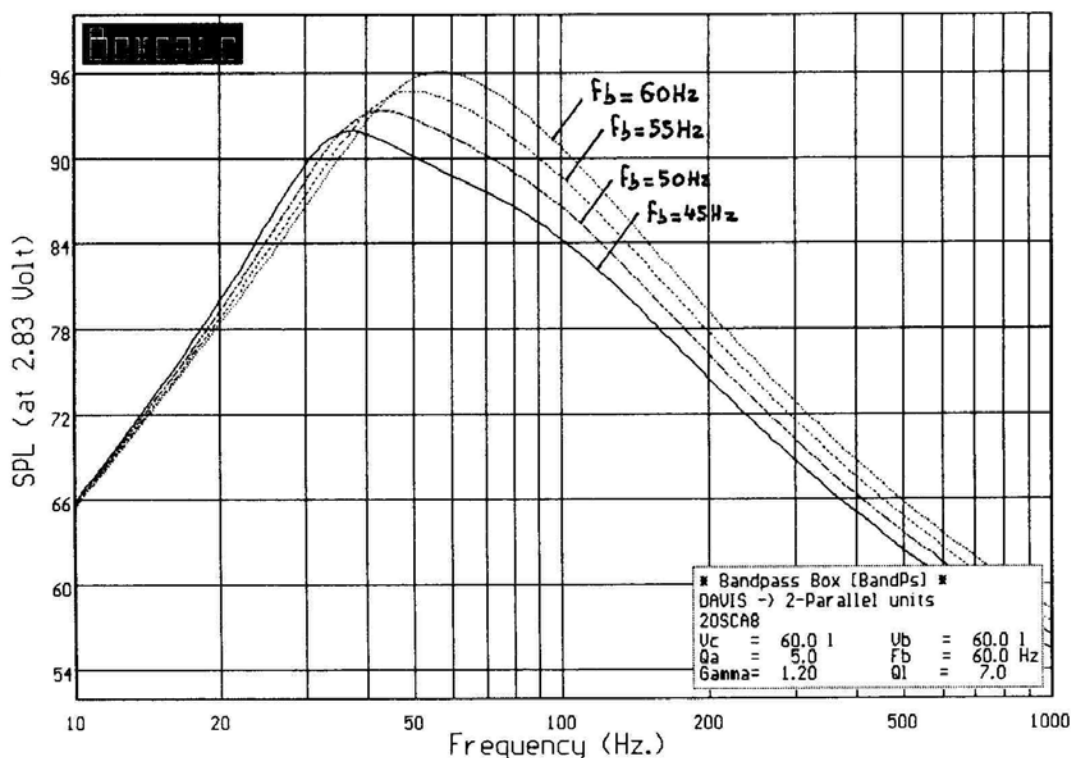


Figure 21: Réponse du montage de deux 20 SCA8 en parallèle

• **Variations de f_B avec maintien des conditions $f_B = f_C$ et $V_C = V_B$:**

Les illustrations précédentes ne sont pas très orthodoxes, puisque le résultat de la variation d'un paramètre, les autres restant constants, conduit à avoir $f_B \neq f_C$. Si l'on cherche à conserver cette égalité en changeant les volumes de charge, il faut faire varier simultanément V_C , V_B , et f_B . La figure 22 illustre les résultats obtenus avec les hypothèses suivantes:

$V_C = V_B$ (litres)	$f_B (= f_C)$ Hz	Q_{TC}
3	180	1,09
6	130	0,84
12	97	0,65
24	75	0,52
48	60	0,43

Haut-Parleur 20 SCA8, monté seul,
Résistance filtre: 0,5 Ω .

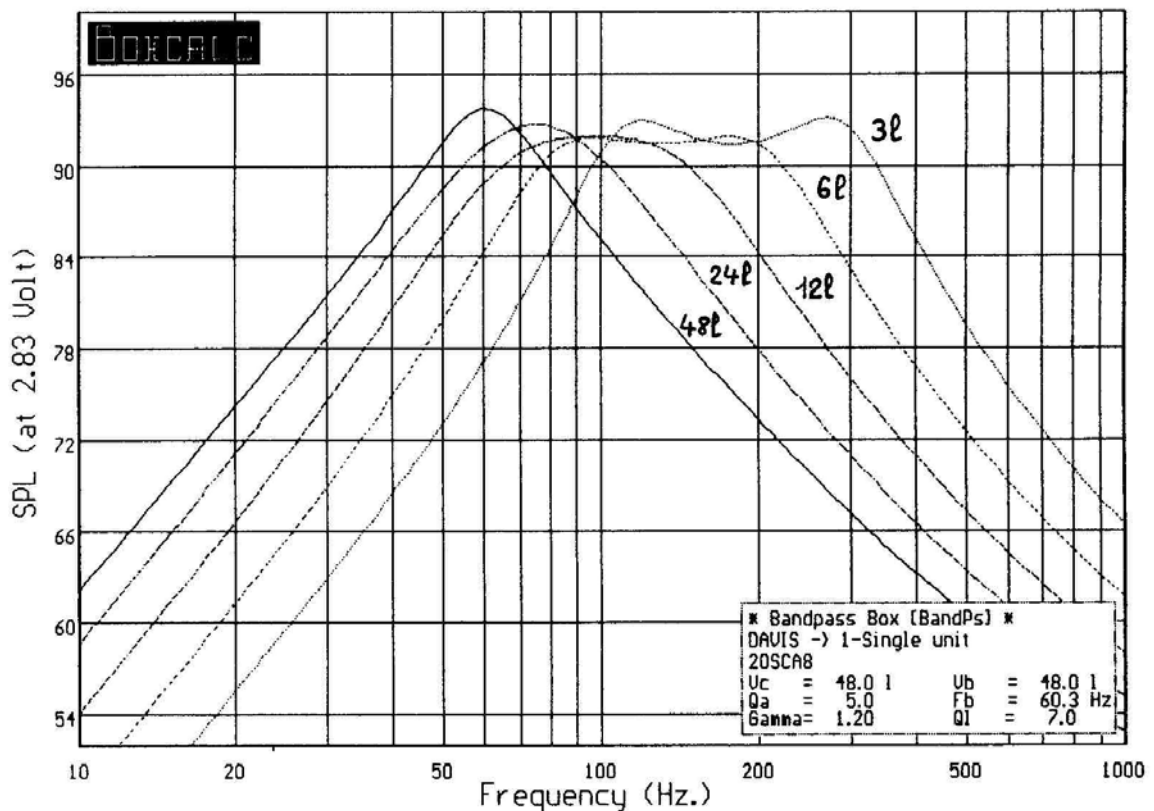


Figure 22: Effet d'une variation simultanée des différents paramètres

On observe alors qu'une diminution du volume conduit à une augmentation de la fréquence d'accord, et de la valeur du coefficient de surtension Q_{TC} du HP, et donc à une largeur de bande plus grande. Le rendement reste très voisin dans tous les cas. On observe donc que ce type de charge permet une grande liberté de conception et des courbes de réponse ajustées aux besoins, tout ceci avec le même haut-parleur!

CONCLUSION

Nous nous sommes un peu étendus sur cette étude, parce qu'il y a trop peu de littérature sur le sujet. Les lecteurs qui souhaiteraient dégrossir le choix d'un HP pourront utiliser les réseaux de courbes présentés, dont la paternité, rappelons-le, revient à P. Augris et D.

Santens (ref [1]). Ces courbes ne prennent pas en compte l'amortissement, ni la possibilité de retenir un accord du résonateur décalé par rapport à la fréquence de résonance du HP monté en charge close. Ceux qui, après avoir effectué ce premier choix, voudront aller plus loin, pourront appliquer l'expression générale présentée. Il suffit d'une bonne calculatrice programmable ou d'un micro-ordinateur.

A suivre...

J.M. Grandemange.

REFERENCES: Outre la référence [1] citée dans cet article, vous trouverez ci-après, à la demande de certains membres, quelques références bibliographiques.

- [1] P. Augris, D. Santens « Optimisation des enceintes à charge symétrique » L'Audiophile, N°23, Février 1982, pp. 46-53.
- [2] AES « Loudspeakers »: An anthology of articles on loudspeakers from the pages of the Journal of the Audio Engineering Society, Vol 1-25 (1953-1977) et Vol 26-31 (1978-1983). Se procurer cette anthologie auprès de la section française de l'AES (Michael Williams, Ile du Moulin, 62 bis, quai de l'Artois, 94170-Le Perreux sur Marne (1) 48 81 46 32. Fax: (1) 47 06 06 48).
- [3] V. Dickason « The Loudspeakers design cookbook ». Old Colony Sound Lab. PO Box 243, Peterborough, New Hampshire 03458-0243 USA, 1987. Si vous n'achetez qu'un ouvrage, achetez celui-là. Je me le suis procuré (ainsi que celui qui suit) chez Euterpe Audio, 4, rue Thiers, 94130 Nogent-sur-Marne. Tel. 48 76 34 74, Fax. 48 77 08 98.
- [4] R.M. Bullock « Bullock on Boxes », Audio Amateur Press, 1991. Même distributeur.
- [5] H.F. Olson « Elements of Acoustical Engineering ». D. Van Nostrand Company, 1947. Certainement difficile à trouver.
- [6] M. Rossi « Electro-Acoustique ». Dunod, 1986. Un manuel de 560 pages bien tassées. Sérieux, mais d'un accès assez ardu.
- [7] P. Loyez « Techniques des haut-parleurs et enceintes acoustiques » Eyrolles. 1992. Un ouvrage bien documenté, particulièrement sur les aspects technologiques.
- [8] C.H. Delaleu « L'optimisation des haut-parleurs et enceintes acoustiques ». Ed. Fréquences. 1983. Un ouvrage avec toutes les formules, mais qui manque un peu de pédagogie. Comporte la règle de conception des enceintes à charge symétrique issue de [1].
- [9] J. Hiraga « Les Haut-Parleurs » Ed. Fréquences, 1981. Ouvrage essentiellement descriptif, mais très complet sur les différentes solutions techniques disponibles.
- [10] Collectif d'auteurs sous la direction de D. Mercier « Le livre des techniques du son » Ed. Fréquences. Tome 1: 1987, Tome 2: 1988, Tome 3: 1993.
- [11] Y. Rocard « Dynamique générale des vibrations ». Masson, 1971. Un incontournable. Je l'ai vu encore récemment à la librairie Eyrolles, Bd St Germain.
- [12] G. Ney « Electroacoustique ». Ecole supérieure d'électricité, 1963. Cours pris par les élèves. Très détaillé sur les analogies entre mécanique et électricité.
- [13] Cours d'électronique analogique (en deux tomes). Niveau BTS, IUT. Eyrolles, 1990.
- [14] J. Riethmuller « Pratique de la Haute-Fidélité ». Société des éditions Radio. 1962.
- [15] J. Panzer « Le calcul des enceintes acoustiques ». Publitrone, 1990. Les programmes indiqués sont enregistrés sur disquette disponible séparément pour une somme modique (95 F).
- [16] E. Leipp « Acoustique et musique ». Masson, 1984.