

Comprendre l'électroacoustique (25)

L'ENCEINTE A CHARGE SYMETRIQUE A DOUBLE RESONATEUR

Dans le numéro spécial N° 47 de AFDERS Confidences, nous avons développé les règles d'optimisation des caissons de grave à charge symétrique. Ces caissons font appel à un HP interne chargé d'un côté par un volume clos, et de l'autre par un résonateur, dont on exploite la réponse.

On peut aussi imaginer que les deux faces de la membrane soient chargées chacune par un résonateur. C'est effectivement ce type de charge qui est utilisé pour le caisson de grave de l'enceinte triphonique Bose « Lifestyle » (reportez-vous à la page 15 du Haut-Parleur N°1820 du mois de Janvier 1994). C'est également ce type de charge qui est utilisée pour les enceintes « Sub-grave » JBL, de technologie TCB (pour « Triple Chamber Band pass », cf. N°26 de la revue AudioTech, pages 36 à 38).

DEUX COMMENTAIRES PRELIMINAIRES

1. Nous avons vu, lors de l'étude de la charge Bass-Reflex, que la réponse de l'évent venait renforcer celle du HP, parce que ces réponses sont en opposition de phase à la résonance (figure 1). Si l'on ajoute un second résonateur identique de l'autre côté de la membrane, il sera lui aussi en opposition de phase par rapport au mouvement de la membrane, et sera donc en phase par rapport au premier (figure 2).

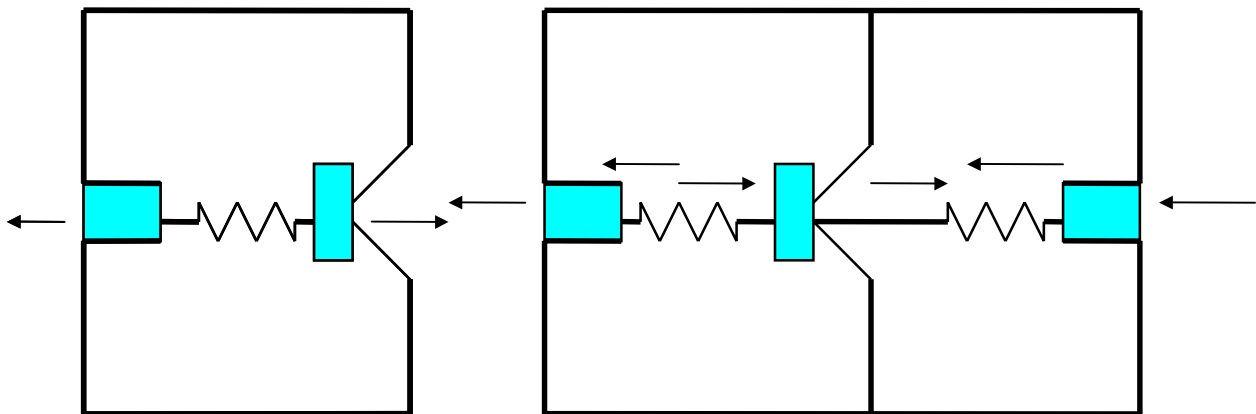


Figure 1.

Figure 2.

La figure 2 montre clairement que, lorsque l'air situé dans l'évent d'un de ces résonateurs sort de l'enceinte, l'autre rentre. Il y a donc annulation mutuelle du rayonnement de chacun de ces résonateurs lorsque leur accord est identique. La charge TCB ne marchera donc que si les accords des deux résonateurs sont décalés.

On a vu toutefois qu'une rotation de phase apparaissait autour de la fréquence de résonance d'un résonateur. Si donc les accords sont décalés (notons les f_A et f_B), dans la plage de fréquence située entre f_A et f_B , les déphasages de la réponse des deux

résonateurs par rapport à l'excitation sont inverses, et les réponses des deux résonateurs s'ajoutent. Le système peut donc marcher, mais si, en-dessous de f_A les deux résonateurs ont un déphasage dans le même sens, leurs réponses auront tendance à s'annuler, et l'on retrouvera une chute de niveau plus importante que dans le cas de l'enceinte à charge symétrique classique, de l'ordre de -24 dB / octave (schéma de principe de la figure 3), comme dans le cas du Bass-Reflex.

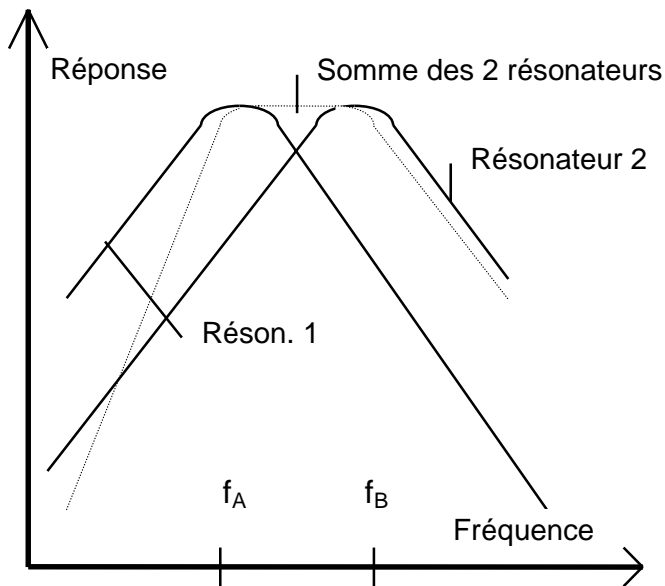


Figure 3.

Au-dessus de f_B , on se situe au-dessus de la fréquence de résonance du HP et la situation se présente différemment: la réponse du résonateur 2 est prédominante et la chute de niveau est de l'ordre de -12 dB/octave. Nous aurons à vérifier que notre simulation aboutit bien à ces conclusions.

2. La deuxième observation sera relative à l'expression « TCB » de JBL. Certes, le caisson comporte trois chambres (figure 4), mais il est strictement identique, sur le plan de la modélisation, à un caisson à **deux** chambres, avec les HP montés en parallèle, le volume V_B étant égal à la somme des volumes V_1 et V_2 des deux chambres, et la section de l'évent étant doublée. Ce qui correspond strictement à la configuration du caisson Bose.

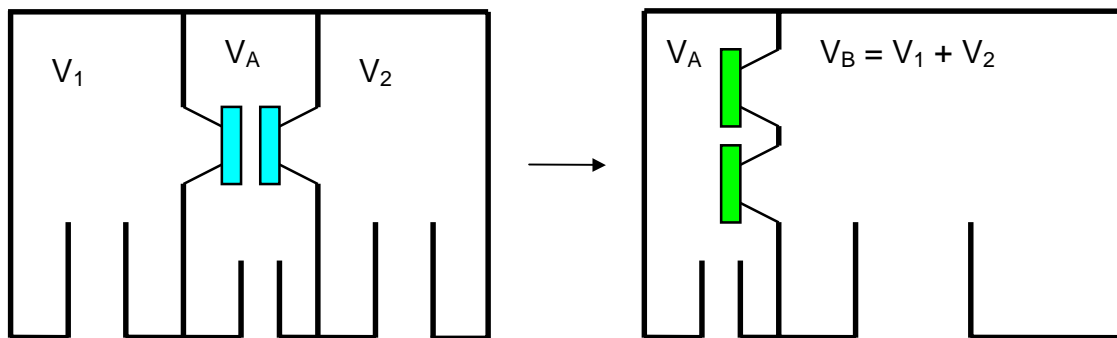


Figure 4.

Nous retiendrons donc cette dernière configuration pour notre analyse.

ANALYSE MECANIQUE

La configuration à étudier est schématisée figure 5. Il suffit de suivre la démarche présentée dans le N°41 et d'exprimer le bilan des forces aux points A à E de la figure 5.

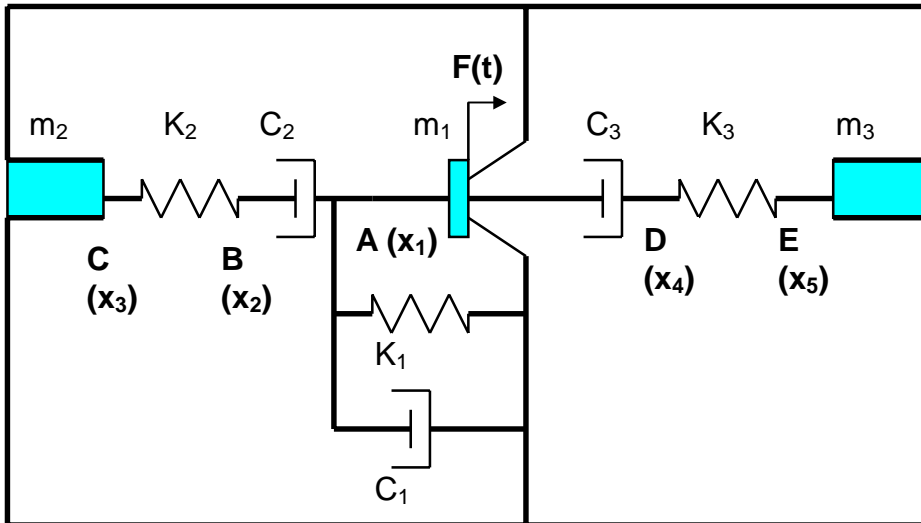


Figure 5.

- (1): Bilan des forces en A: $F(t) - C_1 x_1' - K_1 x_1 - C_2 (x_1' - x_2') - C_3 (x_1' - x_4') = m_1 x_1''$
- (2): Bilan des forces en B: $C_2 (x_1' - x_2') - K_2 (x_2 - x_3) = 0$
- (3): Bilan des forces en C: $K_2 (x_2 - x_3) = m_2 x_3''$
- (4): Bilan des forces en D: $C_3 (x_1' - x_4') - K_3 (x_4 - x_5) = 0$
- (5): Bilan des forces en E: $K_3 (x_4 - x_5) = m_3 x_5''$

Nous obtenons ainsi un système de cinq équations différentielles à 5 inconnues, qu'il reste à résoudre selon la méthode indiqués dans le N°41: si nous écrivons:

$$x_1(t) = X_1 e^{i\omega t} \quad (\text{d'où: } x_1'(t) = i\omega X_1 e^{i\omega t} \text{ et } x_1''(t) = -\omega^2 X_1 e^{i\omega t})$$

$$x_2(t) = \dots$$

....

$$F(t) = F_0 e^{i\omega t}$$

Les équations (1) à (5) se réduisent à:

- (1): $[-\omega^2 m_1 + i\omega (C_1 + C_2 + C_3) + K_1] X_1 - i\omega C_2 X_2 - i\omega C_3 X_4 = F_0$
- (2): $(i\omega C_2) X_1 - (i\omega C_2 + K_2) X_2 + K_2 X_3 = 0$
- (3): $(\omega^2 m_2 - K_2) X_3 + K_2 X_2 = 0$
- (4): $i\omega C_3 X_1 - (i\omega C_3 + K_3) X_4 + K_3 X_5 = 0$
- (5): $K_3 X_4 + (\omega^2 m_3 - K_3) X_5 = 0$

La réponse R du caisson est égale à: $R = X_3 - X_5$. Il nous reste donc à résoudre ce système de 5 équations à 5 inconnues (c'est un peu long, mais pas compliqué) pour obtenir cette réponse. On obtient la réponse suivante:

$$R = \frac{(i\omega)^2 [C_2 C_3 (K_3 m_2 - K_2 m_3)] + i\omega [K_2 K_3 (C_3 m_2 - C_2 m_3)]}{(F_0/m_1) e^{i\omega t}}$$

$$\begin{aligned} & (i\omega)^6 [C_3 C_2 m_2 m_3] + \\ & (i\omega)^5 [m_2 m_3 (K_3 C_2 + C_3 K_2 + C_1 C_2 C_3 / m_1)] + \\ & (i\omega)^4 [K_3 C_3 C_2 m_2 + K_3 K_2 m_2 m_3 + m_3 C_3 K_2 C_2 + \\ & \quad m_2 m_3 / m_1 (C_1 C_2 K_3 + C_2 C_3 K_3 + C_1 C_3 K_2 + C_2 C_3 K_2 + C_3 C_2 K_1)] + \\ & (i\omega)^3 [m_2 K_3 K_2 C_3 + m_3 K_3 K_2 C_2 + C_1 C_2 C_3 / m_1 (K_3 m_2 + K_2 m_3) + \\ & \quad m_2 m_3 / m_1 (C_1 K_3 K_2 + C_2 K_3 K_2 + C_3 K_3 K_2 + K_1 K_3 C_2 + K_1 K_2 C_3)] + \\ & (i\omega)^2 [K_3 C_3 K_2 C_2 + K_2 K_3 m_3 / m_1 (C_1 C_2 + C_2 C_3) + K_2 K_3 m_2 / m_1 (C_1 C_3 + C_2 C_3) + \\ & \quad K_1 C_3 C_2 (K_3 m_2 / m_1 + K_2 m_3 / m_1) + K_1 K_2 K_3 m_2 m_3 / m_1] + \\ & (i\omega) [K_2 K_3 / m_1 (C_1 C_2 C_3 + K_1 C_3 m_2 + K_1 C_2 m_3)] + \\ & K_1 K_2 K_3 C_2 C_3 / m_1 \end{aligned}$$

Afin d'exprimer la réponse en fonction des paramètres normalisés des haut-parleurs, il reste à transformer cette expression à l'aide des égalités suivantes déjà utilisées dans de précédents numéros de AFDERS Confidences. Les indices S sont utilisés pour caractériser le haut-parleur et les indices A et B correspondent respectivement aux deux résonateurs (par convention, nous considérerons que la fréquence d'accord du résonateur A est plus basse que celle du résonateur B):

$$\begin{aligned} C_1/m_1 &= \omega_S / Q_{TS} & \omega_S &= \sqrt{K_1 / m_1 C_1 / K_1} = 1/(\omega_S Q_{TS}) & f &= 2 \pi \omega \\ \omega_A &= \sqrt{K_2 / m_2 C_2 / K_2} = Q_A / \omega_A & C_2 / m_2 &= \omega_A Q_A & K_2 / K_1 &= V_{AS} / V_A \\ \omega_B &= \sqrt{K_3 / m_3 C_3 / K_3} = Q_B / \omega_B & C_3 / m_3 &= \omega_B Q_B & K_3 / K_1 &= V_{AS} / V_B \end{aligned}$$

Après développement et simplification, on trouve, pour la réponse (en déplacement):

$$-R = \frac{-f^2(f_B^2 - f_A^2) + if \left(\frac{f_B^2 \cdot f_A}{Q_A} - \frac{f_A^2 \cdot f_B}{Q_B} \right)}{D} \cdot \frac{F_0}{m_1} \cdot e^{i\omega t}$$

et, pour la réponse en accélération:

$$-\ddot{R} = \frac{f^4(f_B^2 - f_A^2) - if^3 \left(\frac{f_B^2 \cdot f_A}{Q_A} - \frac{f_A^2 \cdot f_B}{Q_B} \right)}{D} \cdot \frac{F_0}{m_1} \cdot e^{i\omega t}$$

où le dénominateur D a l'expression suivante:

$$\begin{aligned} -D &= -f^6 + if^5 \left(\frac{f_B}{Q_B} + \frac{f_A}{Q_A} + \frac{f_S}{Q_{TS}} \right) + f^4 \left[f_B^2 + f_A^2 + \frac{f_B \cdot f_A}{Q_A \cdot Q_B} + \frac{f_S \cdot f_B}{Q_B \cdot Q_{TS}} + \frac{f_S \cdot f_A}{Q_{TS} \cdot Q_A} + f_S^2 \cdot \left(1 + \frac{V_{AS}}{V_B} + \frac{V_{AS}}{V_A} \right) \right] \\ &- if^3 \left[\frac{f_A}{Q_A} (f_B^2 + f_S^2) + \frac{f_B}{Q_B} (f_A^2 + f_S^2) + \frac{f_S}{Q_{TS}} (f_B^2 + f_A^2) + f_S^2 \cdot V_{AS} \left(\frac{f_B}{Q_B \cdot V_A} + \frac{f_A}{Q_A \cdot V_B} \right) + \frac{f_S \cdot f_A \cdot f_B}{Q_{TS} \cdot Q_A \cdot Q_B} \right] \\ &- f^2 \left[f_B^2 \cdot f_A^2 + f_S^2 \cdot f_B^2 + f_S^2 \cdot f_A^2 + \frac{f_S \cdot f_B \cdot f_A^2}{Q_{TS} \cdot Q_B} + \frac{f_S \cdot f_A \cdot f_B^2}{Q_{TS} \cdot Q_A} + \frac{f_A \cdot f_B \cdot f_S^2}{Q_A \cdot Q_B} + \frac{f_S^2 \cdot f_A^2 \cdot V_{AS}}{V_B} + \frac{f_S^2 \cdot f_B^2 \cdot V_{AS}}{V_A} \right] \\ &+ if \left[\frac{f_S \cdot f_A^2 \cdot f_B^2}{Q_{TS}} + \frac{f_A \cdot f_S^2 \cdot f_B^2}{Q_A} + \frac{f_B \cdot f_A^2 \cdot f_S^2}{Q_B} \right] + f_S^2 \cdot f_A^2 \cdot f_B^2 \end{aligned}$$

Pour obtenir le niveau sonore, il suffit de prendre le module de l'expression complexe ainsi obtenue, et pour obtenir le déphasage, il suffit d'en prendre l'argument. Nous nous bornerons ci-après à donner l'expression obtenue pour le module, tout possesseur d'une calculatrice programmable ou d'un micro-ordinateur pourra ainsi s'exercer à la conception de caissons de grave TCB:

$$|\ddot{R}|^2 = \frac{[f^4(f_B^2 - f_A^2)]^2 + [f^3(\frac{f_B^2 \cdot f_A}{Q_A} - \frac{f_A^2 \cdot f_B}{Q_B})]^2}{\left[-f^6 + f^4 \left[f_B^2 + f_A^2 + \frac{f_B \cdot f_A}{Q_A \cdot Q_B} + \frac{f_S \cdot f_B}{Q_B \cdot Q_{TS}} + \frac{f_S \cdot f_A}{Q_{TS} \cdot Q_A} + f_S^2 \left(1 + \frac{V_{AS}}{V_B} + \frac{V_{AS}}{V_A} \right) \right] \right.} + \left. \left[-f^2 [f_B^2 \cdot f_A^2 + f_S^2 \cdot f_A^2 + f_S^2 \cdot f_B^2 + \frac{f_S \cdot f_B \cdot f_A^2}{Q_{TS} \cdot Q_B} + \frac{f_S \cdot f_A \cdot f_B^2}{Q_{TS} \cdot Q_A} + \frac{f_B \cdot f_A \cdot f_S^2}{Q_A \cdot Q_B} + f_S^2 \cdot V_{AS} \left(\frac{f_A^2}{V_B} + \frac{f_B^2}{V_A} \right)] + f_S^2 \cdot f_A^2 \cdot f_B^2 \right] \right.} + \left. \left[f^5 \left(\frac{f_B}{Q_B} + \frac{f_A}{Q_A} + \frac{f_S}{Q_{TS}} \right) - f^3 \left[\frac{f_A}{Q_A} (f_B^2 + f_S^2) + \frac{f_B}{Q_B} (f_A^2 + f_S^2) + \frac{f_S}{Q_{TS}} (f_A^2 + f_B^2) + \frac{f_S \cdot f_A \cdot f_B}{Q_{TS} \cdot Q_A \cdot Q_B} \right] \right. \right.} + \left. \left. \left[f_S^2 \cdot V_{AS} \left(\frac{f_B}{Q_B \cdot V_A} + \frac{f_A}{Q_A \cdot V_B} \right) \right] + f \cdot \left[\frac{f_S \cdot f_A^2 \cdot f_B^2}{Q_{TS}} + \frac{f_A \cdot f_S^2 \cdot f_B^2}{Q_A} + \frac{f_B \cdot f_S^2 \cdot f_A^2}{Q_B} \right] \right] \right.}^2$$

A cette expression doit être ajouté le rendement de référence η_0 du HP, vu dans le précédent numéro. Exprimé en dB, l'expression est la suivante:

$$\text{Niveau sonore} = 10 \log |R|^2 + \eta_0 \text{ (dB)}$$

Cette formule est apparemment complexe, elle pourrait être simplifiée en supposant, ce qui est vraisemblable, que les valeurs Q_A et Q_B sont choisies égales. Mais au siècle de l'informatique, il est préférable de conserver l'expression complète, qui permet toutes les simulations. Il faut si peu de temps pour effectuer le calcul complet! A titre d'exemple, un portable 386 SL avec coprocesseur a mis moins de 7 secondes à calculer 90 fois l'expression ci-dessus entre 10 Hz et 100 Hz, et à tracer la courbe de réponse correspondante. A ce régime, un 486 DX2 66 devrait effectuer le même travail en une seconde... On peut alors procéder par essais et erreurs, jusqu'à obtenir la courbe désirée.

L'exemple donné figure 6 est relatif à nos HP Davis 20 SCA 8 montés en Push-Pull, dans un caisson de taille globale voisine de celui de l'enceinte Kristel (soit deux résonateurs de volumes respectifs d'environ 90 litres et 30 litres, accordés respectivement à environ 30 Hz et 50 Hz). L'objectif était d'obtenir une coupure haute à 60 Hz et de passer le 30 Hz avec un rendement supérieur ou égal à 90 dB/1W/1m. Les paramètres retenus pour cette figure sont les suivants:

$$f_A = 28 \text{ Hz} \quad f_B = 49 \text{ Hz} \quad V_A = 92 \text{ l} \quad V_B = 28 \text{ l} \quad Q_A = Q_B = 7$$

$$f_S = 42 \text{ Hz} \quad V_{AS} = 32.5 \text{ (HP en Push-Pull)} \quad Q_{TS} = 0,33$$

Par rapport au résultat obtenu dans le N°47 avec les mêmes HP, la bande passante dans la plage 30 Hz - 60 Hz est plus régulière, mais la chute de niveau dans l'extrême-grave est beaucoup plus rapide. La figure indique que le niveau du médium 20 TK8 monté en charge close dans 40 litres fournit même un niveau théorique supérieur à celui du caisson en dessous de 16 Hz. Mais à cette fréquence et à ces niveaux, est-ce vraiment significatif?

Un autre avantage du montage à double résonateur est de limiter le débattement du HP aux fréquences d'accord des résonateurs, soit ici à 30 Hz et 50 Hz. Les possibilités dans l'extrême grave associées à des excursions limitées des HP expliquent l'intérêt de Bose et JBL pour cette solution.

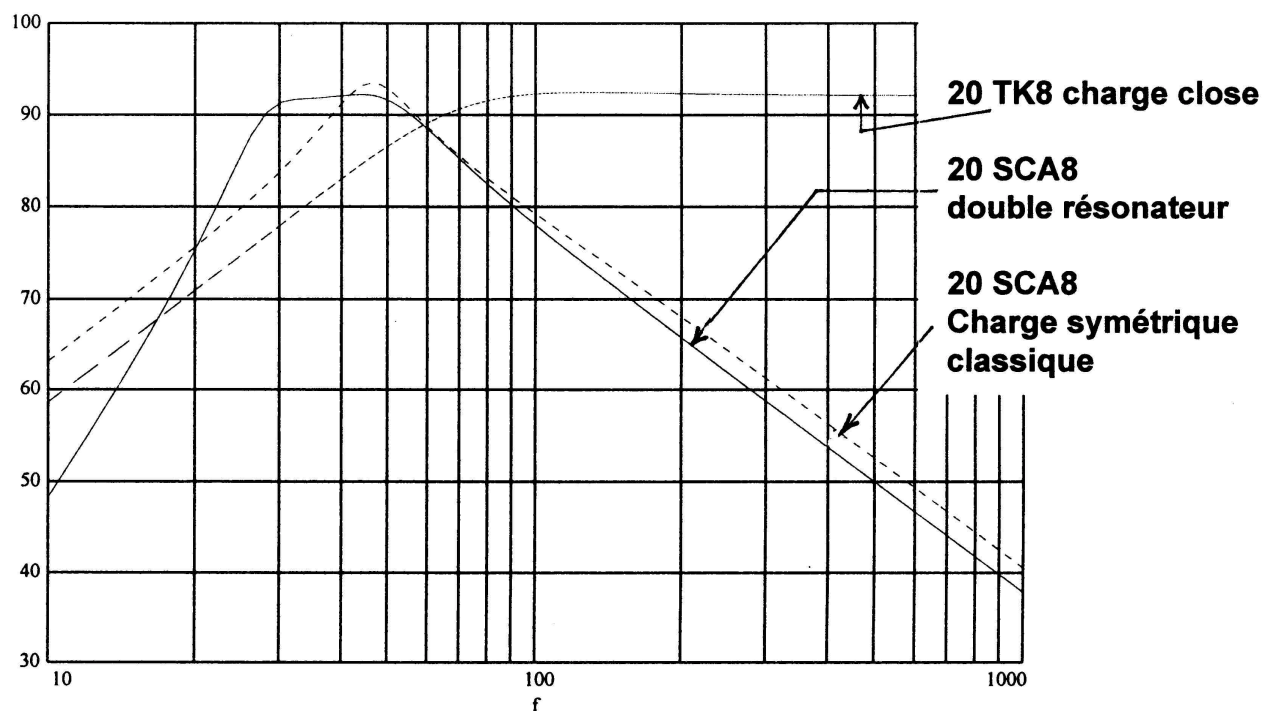


Figure 6: 20 SCA 8 Push-Pull: Réponse en fréquences en enceinte à double résonateur et comparaison avec la charge symétrique classique et la réponse en fréquences du 20 TK8 monté en charge close de 40 litres. (Paramètres de la charge symétrique: $V_C = 30$ l, $V_B = 40$ l, $f_B = 47$ Hz, $Q_A = 5$, $\gamma = 1,2$, $Q_B = 7$).

Depuis la parution du N°47 de AFDERS Confidences, un collègue audiophile m'a prêté l'ouvrage ci-après, qui est également à conseiller. Il y a peu de théorie, mais beaucoup de conseils pratiques. Il s'agit de l'ouvrage « Great Sound Stereo (with projects) » de David B. Weems, aux éditions TAB Books, Blue Ridge Summit, PA (USA), éd. 1990. Sur la charge décrite ici, voici ce que dit cet ouvrage:

« Ce type de charge peut être utilisé pour un rapport de fréquences d'accord de 1,5 à 3 et un rapport de volumes de 2 à 4. Alors que la coupure de ce système dans le bas est au taux habituel du Bass-Reflex, soit - 24 dB/octave, la coupure haute se fait à - 12 dB/octave à environ 1/4 d'octave au-delà de la fréquence d'accord haute...

Pour construire ce type de Subwoofer, vous devriez prendre pour volume du compartiment le plus grand 3 fois le volume du plus petit. Pour accorder les deux compartiments avec un écart d'une octave, l'évent du compartiment le plus grand doit être environ deux fois plus long que celui du plus petit, s'ils ont même section... Prévoyez une expérimentation considérable pour arriver à vos fins ».

Sans formules et en peu de mots, on retrouve assez bien nos propres conclusions. A suivre...

J.M. Grandemange.