

Les enceintes à « Auto-régulation acoustique »

INTRODUCTION

La motivation de cet article est venue suite à l'optimisation d'une réalisation qui a fait l'objet d'une description dans les colonnes du bulletin (cf. numéros 65, 66, 68 et 72). En effet, je me suis retrouvé à l'issue de celle-ci avec plusieurs éléments inutilisés : une paire de haut-parleurs Davis 20 TK8 large bande, de tweeters Technics 5 HH10, et de haut-parleurs grave-médium (ceux utilisés dans la voie grave de l'enceinte de référence de l'Afders), un nombre conséquent de planches provenant des découpes intérieures de la première réalisation, et un certain nombres de composants de filtre. La règle du jeu était donc la suivante : réaliser une colonne d'encombrement plus limité, exploitant exclusivement les éléments disponibles, et passant si possible le 30 Hz à 0 dB...

Le 20 TK8 a, comme indiqué précédemment, un Q_{TS} compris entre 0,8 et 1, ce qui le destine à une charge close. Sa fréquence de résonance étant comprise entre 50 et 60 Hz, l'extension de la bande passante dans le grave sera nécessairement limitée dans cette configuration. Ce haut-parleur peut être exploité dans une charge faisant appel à une ligne acoustique, comme dans le Kit « Klarence » de Davis Acoustics. On peut aussi songer à une charge TQWT. Mais je n'ai pas encore tenté la modélisation de ces configurations, et je craignais un peu de redondance dans le haut-grave ; en outre, les planches dont je disposais impliquaient une réalisation à base d'empilement, de manière semblable à la première réalisation.

Pourquoi dans ces conditions ne pas faire appel à une charge de type « auto-régulation acoustique » chère à P.E. Léon (cf. enceinte Enzo) qui utiliserait les propriétés du 20 TK8 dans le haut-grave et le médium, en l'appuyant dans le bas par un des HP de grave de l'enceinte Afders ?

PRINCIPE

Le principe de « l'auto-régulation acoustique » a été très peu décrit dans la littérature technique. Sur plusieurs milliers de pages de littérature anglo-saxonne dont je dispose, la somme de celles qui font allusion à cette technique doit se compter sur les doigts des deux mains. Les informations les plus utiles sont celles parues dans l'ouvrage de P. Loyez « Techniques des haut-parleurs et enceintes acoustiques » (Editions Fréquences, 1992), l'ouvrage de V. Dickason « Enceintes acoustiques et haut-parleurs » (Publitrone, 1996) se limitant à traiter du montage de deux haut-parleurs jumelés dans le grave, qui se traduit simplement par une division par 2 du V_{AS} du haut-parleur.

Le principe de cette technique est illustré figure 1. Un haut-parleur placé en façade restitue l'essentiel du message musical. Un second haut-parleur placé à l'intérieur simule une charge infinie pour ce premier haut-

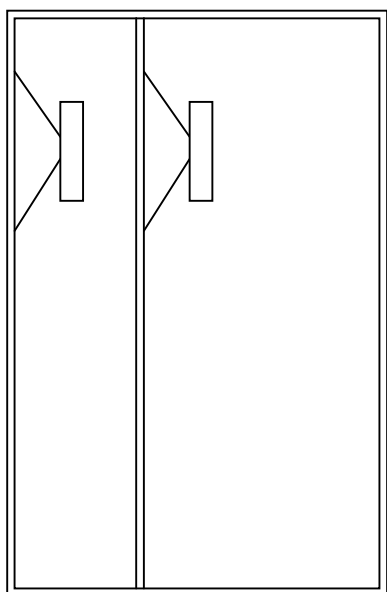


Figure 1

parleur, son branchement en phase avec le premier générant en effet dans le volume situé entre les deux haut-parleurs une pression constante (d'où le nom d'« isobarik » donné à cette technique par un constructeur comme Linn).

La plupart des ouvrages recommandent de retenir deux haut-parleurs de même type, ce qui n'est pas évident a priori. En effet, le haut-parleur interne voit un volume clos ou un résonateur de Helmholtz sur sa face arrière, ce qui modifie sa fréquence de résonance ou son comportement et donc ne permet plus de maintenir une pression constante dans le volume inter-HP. Si ceux-ci sont très rapprochés, la raideur de l'air entre les deux HP est importante et tout se passe comme si l'on avait affaire à un seul HP dont le V_{AS} serait divisé par deux, ainsi que nous le démontrerons plus loin. Le plus intelligent est de faire appel à un HP interne tel que, compte-tenu de sa charge, il permette autant que possible de simuler une charge infinie pour le ou les haut-parleurs situés sur la face avant. C'était la technique retenue par G. Millot pour les enceintes « Aura » dont les anciens membres de l'Afders conservent un souvenir ému.

Il n'y a donc aucune raison que les deux haut-parleurs soient identiques, ni même qu'ils soient alimentés à la même puissance, ou par le même amplificateur. L'ouvrage de P. Loyez recommande à cet égard d'utiliser un HP interne à résonance très basse, voire de l'alimenter avec une puissance supérieure, ce qui est tout à fait cohérent avec les observations ci-dessus. Une autre solution est d'utiliser un HP interne à rendement (facteur de force BL) plus élevé.

MAIS COMMENT OPTIMISER CE TYPE DE CHARGE ?

J'ai dit beaucoup de bien du logiciel Boxdraw dans le N°69 (Septembre 97). Las, si ce logiciel permet de simuler beaucoup de choses, il interdit d'alimenter simultanément deux haut-parleurs différents situés dans deux configurations de charge différentes. Il nous faut donc prendre notre courage à deux mains et ne compter que sur nos propres forces, selon une démarche employée antérieurement pour la simulation des charges symétriques. Nous reviendrons successivement ci-après sur la modélisation de la charge close, de l'auto-régulation acoustique avec HP interne monté en charge close. Le cas du HP interne monté en charge bass-reflex sera abordé dans le prochain numéro.

RETOUR SUR LA CHARGE CLOSE

Le principe de la charge close est illustré figure 2. Les forces en présence sont les suivantes, si nous négligeons les amortissements internes à l'enceinte :

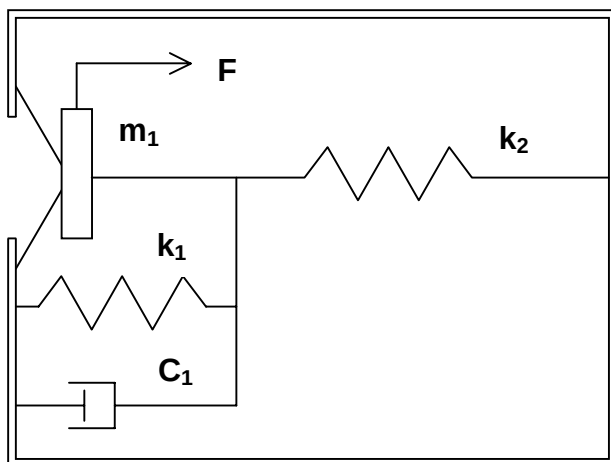


Figure 2

- la force F délivrée par l'amplificateur ($F = Bli$, où B est l'induction magnétique, l la longueur de fil de la bobine mobile dans l'entrefer, et i l'intensité du courant) est appliquée à une masse mobile m_1 ,
- cette masse mobile est rappelée par un ressort de rappel (suspension) de raideur k_1 générant une force de sens opposé de valeur k_1x_1 , où x_1 est la position de la masse mobile,
- les termes d'amortissement internes au HP conduisent à une

force également opposée à F et fonction de la vitesse (cette force est égale à $C_1 x'_1$, où C_1 a la dimension d'un coefficient de frottement, et x'_1 est la dérivée de x_1 , c'est à dire la vitesse de la masse mobile m_1).

- Enfin, l'élasticité de l'air compris dans le volume de l'enceinte close, conduit à une force s'opposant également à F et de valeur $k_2 x_1$. En pratique, la raideur du haut-parleur étant exprimée sous la forme de celle d'un volume d'air équivalent (le V_{AS}), il suffira de faire apparaître dans les expressions mathématiques le rapport k_1/k_2 et de le remplacer par le rapport équivalent du volume V_B de l'enceinte au V_{AS} du haut-parleur.

La deuxième loi de Newton (vous savez, $F = m\gamma$) permet d'écrire que la somme de ces forces est égale au produit de la masse mobile m_1 par l'accélération γ , c'est à dire x''_1 , dérivée seconde de x_1 . On obtient ainsi l'équation suivante :

$$F - C_1 x'_1 - k_1 x_1 - k_2 x_1 = m_1 x''_1 \quad (1)$$

Si l'on se place en régime sinusoïdal, on peut utiliser la formule d'Euler, vue dans le N°19 :

$$e^{i\omega t} = \cos \omega t + i \sin \omega t$$

où ω est la pulsation ($f = 2 \pi \omega$, f étant la fréquence).

Ainsi, si $x_1 = X_1 e^{i\omega t}$, alors $x'_1 = i\omega X_1 e^{i\omega t}$ et $x''_1 = i^2 \omega^2 X_1 e^{i\omega t} = -\omega^2 X_1 e^{i\omega t}$.

La formule (1) peut donc se réduire à :

$$X_1 \left[(i\omega)^2 m_1 + (i\omega) C_1 + k_1 + k_2 \right] = F \quad (2)$$

Soit encore :

$$X_1 = \frac{F}{m_1} \left[\frac{1}{(i\omega)^2 + (i\omega) \frac{C_1}{m_1} + \frac{k_1}{m_1} + \frac{k_2}{m_1}} \right] \quad (3)$$

Exprimons les différents termes de cette expression dans le langage des spécifications normalisées, comme nous avons appris à le faire dans les numéros 21 à 28 du bulletin :

$$C_1/m_1 = \omega_S/Q_{TS} \quad \text{où } f_S = 2 \pi \omega_S \text{ est la fréquence de résonance du HP} \\ \text{et } Q_{TS} \text{ son coefficient de surtension}$$

$$k_1/m_1 = \omega_S^2$$

$$k_2/k_1 = V_{AS}/V_B$$

La réponse en déplacement s'obtient en substituant ces expressions à celles de la formule (3) :

$$x_1 = \frac{\text{constante}}{-f^2 + \frac{if f_S}{Q_{TS}} + f_S^2 + \frac{V_{AS}}{V_B} f_S^2} e^{i\omega t} \quad (4)$$

Pour obtenir la réponse en accélération, c'est à dire en niveau sonore, il suffit de dériver deux fois cette expression, c'est à dire de multiplier cette expression par $-f^2$:

$$\ddot{x}_1 = \left[\frac{\text{constante} \times (-f^2)}{-f^2 + \frac{if f_S}{Q_{TS}} + f_S^2 + \frac{V_{AS}}{V_B} f_S^2} \right] e^{i\omega t} \quad (5)$$

La réponse R exprimée en dB est obtenue en prenant 10 log du carré du module du nombre complexe entre crochets, exprimant cette réponse, l'argument donnant le déphasage. On obtient :

$$R = 10 \text{Log} \left[\frac{f^4}{\left[-f^2 + f_S^2 \left(1 + \frac{V_{AS}}{V_B} \right) \right]^2 + \left[\frac{f f_S}{Q_{TS}} \right]^2} \right] \quad (6)$$

AUTOREGULATION ACOUSTIQUE A CHARGE ARRIERE CLOSE

Le schéma de principe du montage est illustré figure 3. Nous rajoutons simplement par rapport au cas précédent le second haut-parleur sollicité par une force αF (afin de représenter la possibilité qu'il soit alimenté avec une puissance différente, ou qu'il soit d'un niveau d'efficacité différent), sa masse m_2 , sa raideur k_3 , son coefficient de frottement C_2 , et la raideur k_4 de l'air enfermé dans la seconde enceinte. La méthode de résolution suit la même démarche que ci-dessus.

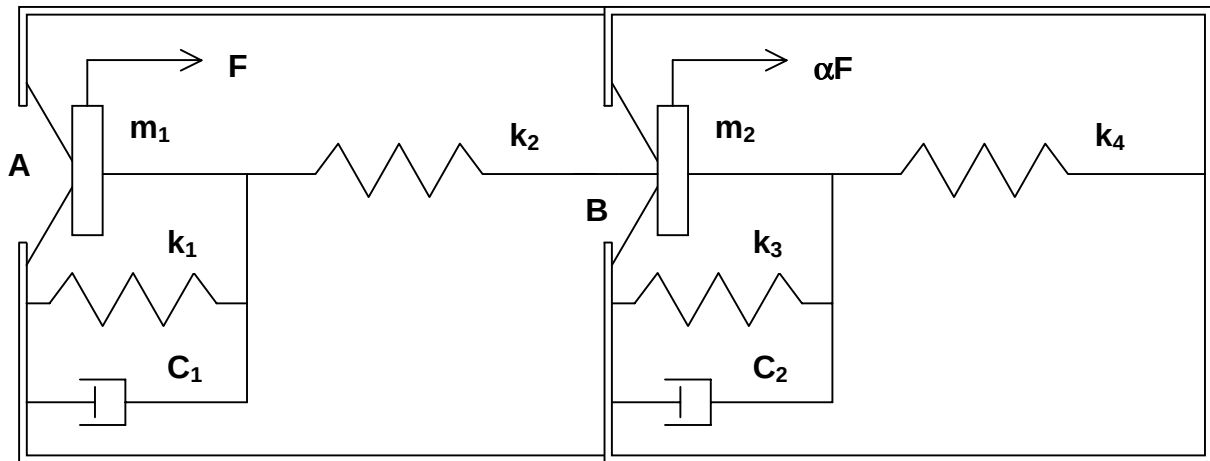


Figure 3

Exprimons la deuxième loi de Newton. Elle conduit aux équations suivantes :

➤ En A : $F - C_1 \dot{x}_1 - k_1 x_1 - k_2 (x_1 - x_2) = m_1 \ddot{x}_1$ (7)

➤ En B : $k_2 (x_1 - x_2) + \alpha F - k_3 x_2 - C_2 \dot{x}_2 - k_4 x_2 = m_2 \ddot{x}_2$ (8)

En utilisant la formule d'Euler, et en écrivant $x_1 = X_1 e^{i\omega t}$, les formules (7) et (8) peuvent se réduire à :

$$X_1 \left[(i\omega)^2 m_1 + (i\omega) C_1 + k_1 + k_2 \right] - k_2 X_2 = F \quad (9)$$

$$X_2 \left[(i\omega)^2 m_2 + (i\omega) C_3 + k_3 + k_2 + k_4 \right] - k_2 X_1 = \alpha F \quad (10)$$

Il reste à résoudre ce système de deux équations à deux inconnues. Ce qui nous intéresse, c'est la réponse X_1 . Je vous passe les détails du calcul (ceux que ça intéresse peuvent les demander). On obtient :

$$X_1 = \frac{F}{m_1} \left[\frac{(i\omega)^2 + (i\omega) \frac{C_3}{m_2} + \frac{k_4}{m_2} + \frac{k_3}{m_2} + \frac{k_2}{m_2} (1 + \alpha)}{(i\omega)^4 + (i\omega)^3 \left[\frac{C_3}{m_2} + \frac{C_1}{m_1} \right] + (i\omega)^2 \left[\frac{1}{m_2} (k_3 + k_2 + k_4) + \frac{1}{m_1} (k_1 + k_2) + \frac{C_1 C_3}{m_1 m_2} \right] + \frac{(i\omega)}{m_1 m_2} [C_1 (k_2 + k_3 + k_4) + C_3 (k_1 + k_2)] + \frac{k_1}{m_1 m_2} (k_2 + k_3 + k_4) + \frac{k_2}{m_1 m_2} (k_3 + k_4)} \right] \quad (11)$$

Exprimons, comme nous l'avons fait précédemment, les différents termes de cette expression dans le langage des spécifications normalisées. La réponse en déplacement s'obtient en substituant ces expressions à celles de la formule (11) :

$$x_1 = \frac{\text{constante} \left[-f^2 + if \frac{f_{S2}}{Q_{TS2}} - f_{S2}^2 \left(1 + \frac{V_{AS2}}{V_B} + (1 + \alpha) \frac{V_{AS2}}{V_A} \right) \right]}{\left[f^4 - if^3 \left[\frac{f_{S2}}{Q_{TS2}} + \frac{f_{S1}}{Q_{TS1}} \right] - f^2 \left[f_{S2}^2 \left(1 + \frac{V_{AS2}}{V_A} + \frac{V_{AS2}}{V_B} \right) + \frac{f_{S1} f_{S2}}{Q_{TS1} Q_{TS2}} + f_{S1}^2 \left(1 + \frac{V_{AS1}}{V_A} \right) \right] + if \left[f_{S2}^2 \frac{f_{S1}}{Q_{TS1}} \left(1 + \frac{V_{AS2}}{V_A} + \frac{V_{AS2}}{V_B} \right) + f_{S1}^2 \frac{f_{S2}}{Q_{TS2}} \left(1 + \frac{V_{AS1}}{V_A} \right) \right] + f_{S2}^2 f_{S1}^2 \left[1 + \frac{V_{AS2}}{V_A} + \frac{V_{AS2}}{V_B} + \frac{V_{AS1}}{V_A} + \frac{V_{AS1} V_{AS2}}{V_A V_B} \right] \right]} e^{i\omega t} \quad (12)$$

Pour obtenir la réponse en accélération, c'est à dire en niveau sonore, il suffit de dériver deux fois cette expression, c'est à dire de la multiplier par $-f^2$:

$$\ddot{x}_1 = \frac{\text{constante} \left[+f^4 - if^3 \frac{f_{S2}}{Q_{TS2}} - f^2 f_{S2}^2 \left(1 + \frac{V_{AS2}}{V_B} + (1 + \alpha) \frac{V_{AS2}}{V_A} \right) \right]}{\left[f^4 - if^3 \left[\frac{f_{S2}}{Q_{TS2}} + \frac{f_{S1}}{Q_{TS1}} \right] - f^2 \left[f_{S2}^2 \left(1 + \frac{V_{AS2}}{V_A} + \frac{V_{AS2}}{V_B} \right) + \frac{f_{S1} f_{S2}}{Q_{TS1} Q_{TS2}} + f_{S1}^2 \left(1 + \frac{V_{AS1}}{V_A} \right) \right] + if \left[f_{S2}^2 \frac{f_{S1}}{Q_{TS1}} \left(1 + \frac{V_{AS2}}{V_A} + \frac{V_{AS2}}{V_B} \right) + f_{S1}^2 \frac{f_{S2}}{Q_{TS2}} \left(1 + \frac{V_{AS1}}{V_A} \right) \right] + f_{S2}^2 f_{S1}^2 \left[1 + \frac{V_{AS2}}{V_A} + \frac{V_{AS2}}{V_B} + \frac{V_{AS1}}{V_A} + \frac{V_{AS1} V_{AS2}}{V_A V_B} \right] \right]} e^{i\omega t} \quad (13)$$

La réponse R exprimée en dB est obtenue en prenant 10 log du carré du module du nombre complexe exprimant cette réponse, l'argument donnant le déphasage. On obtient :

$$R=10\text{Log} \frac{\left[+f^4 - f^2 f_{S2}^2 \left(1 + \frac{V_{AS2}}{V_B} + (1+\alpha) \frac{V_{AS2}}{V_A} \right) \right]^2 + \left[-f^3 \frac{f_{S2}}{Q_{TS2}} \right]^2}{\left[f^4 - f^2 \left[f_{S2}^2 \left(1 + \frac{V_{AS2}}{V_A} + \frac{V_{AS2}}{V_B} \right) + \frac{f_{S1}f_{S2}}{Q_{TS1}Q_{TS2}} + f_{S1}^2 \left(1 + \frac{V_{AS1}}{V_A} \right) \right] \right]^2 + \left[f_{S2}^2 f_{S1}^2 \left[1 + \frac{V_{AS2}}{V_A} + \frac{V_{AS2}}{V_B} + \frac{V_{AS1}}{V_A} + \frac{V_{AS1}V_{AS2}}{V_A V_B} \right] \right]^2 + \left[-f^3 \left[\frac{f_{S2}}{Q_{TS2}} + \frac{f_{S1}}{Q_{TS1}} \right] + f \left[f_{S2}^2 \frac{f_{S1}}{Q_{TS1}} \left(1 + \frac{V_{AS2}}{V_A} + \frac{V_{AS2}}{V_B} \right) + \frac{f_{S1}^2 f_{S2}}{Q_{TS2}} \left(1 + \frac{V_{AS1}}{V_A} \right) \right] \right]^2} \quad (14)$$

Si l'on retient deux haut-parleurs identiques, c'est à dire : $f_{S1} = f_{S2} = f_S$, $Q_{TS1} = Q_{TS2} = Q_{TS}$, $V_{AS1} = V_{AS2} = V_{AS}$, $\alpha = 1$, et si l'on suppose les deux haut-parleurs très proches l'un de l'autre ($V_A = 0$), l'expression (14) devient :

$$R=10\text{Log} \left[\frac{f^4}{\left[-f^2 + f_S^2 \left(1 + \frac{V_{AS}}{2V_B} \right) \right]^2 + \left[\frac{f f_S}{Q_{TS}} \right]^2} \right] \quad (15)$$

Ce qui est strictement identique à la formule (6) où l'on a remplacé V_{AS} par $V_{AS}/2$. Vous allez me dire : comment peut-on remplacer V_A par 0, alors qu'il apparaît au dénominateur dans l'expression (14) ? Il suffit simplement de multiplier numérateur et dénominateur par V_A , puis de remplacer V_A par 0. Tous les termes qui ne comportent pas V_A dans l'expression (14) s'annulent alors, et il ne reste que les termes qui sont en facteur de V_A dans cette expression. (15) est une remise en forme de la formule ainsi obtenue.

Comparons dans le cas du haut-parleur 20TK8 la réponse d'un HP ayant un V_{AS} égal à $V_{AS}/2$, donnée par (15) et la réponse de 2 haut-parleurs montés en configuration « Isobarik », donnée par (14). On observe que les deux réponses sont très semblables, à l'exception de l'effet de la raideur de l'air situé entre les deux haut-parleurs, qui conduit à une petite perturbation de la courbe de réponse à fréquence d'autant plus élevée que ce volume est petit (400 Hz pour $V_A = 1\text{l}$, figures 4 et 100 Hz pour $V_A = 15\text{l}$, figure 5).

Les courbes obtenues avec la configuration Isobarik sont donc, comme l'indique V. Dickason, très voisines de celles qui seraient obtenues avec un haut-parleur de V_{AS} moitié, particulièrement dans le cas où les deux HP sont très proches l'un de l'autre, le volume d'air agissant dans ce cas comme un ressort très raide liant étroitement le comportement des deux HP. Ce montage permet donc, si les deux HP sont identiques, d'obtenir la même courbe dans le grave qu'avec un seul haut-parleur, mais dans un volume moitié. L'intérêt ne va pas beaucoup au-delà.

Si maintenant on place en face avant un 20 TK8 et à l'arrière le haut-parleur grave de l'enceinte Afders, les différences de comportement conduisent à solliciter fortement le volume inter-HP. S'il est petit (1l, par exemple), on retrouve figure 6 la perturbation à 400 Hz de la figure 4, nettement amplifiée (elle est un peu moins marquée pour $\alpha = 1$). De

même, figure 7, on retrouve la perturbation à 100 Hz pour un V_A égal à 15 litres. Sinon, la courbe obtenue est une moyenne entre le comportement de chacun de ces deux haut-parleurs, dont les Q_{TS} , les V_{AS} et les fréquences de résonances sont très différents.

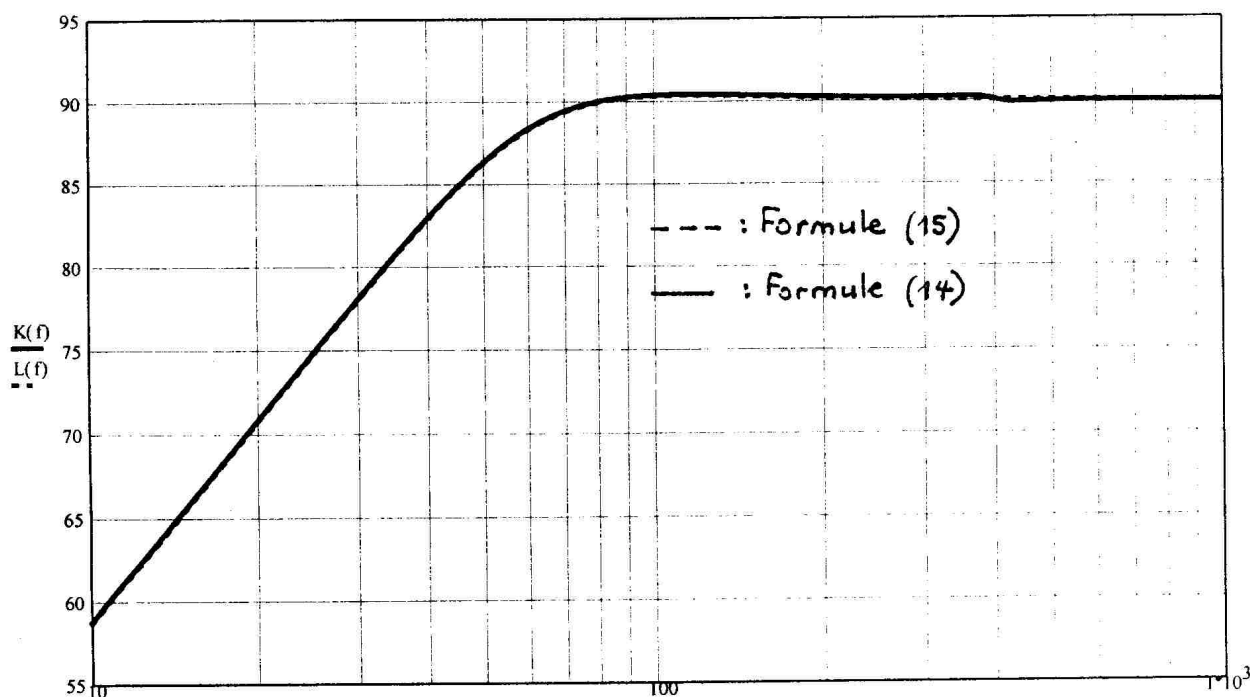


Figure 4 : Cas de deux haut-parleurs 20TK8 ($f_s = 51$ Hz, $V_{AS} = 29,5$ l, $Q_{TS} = 0.7$), $V_A = 1$ l.

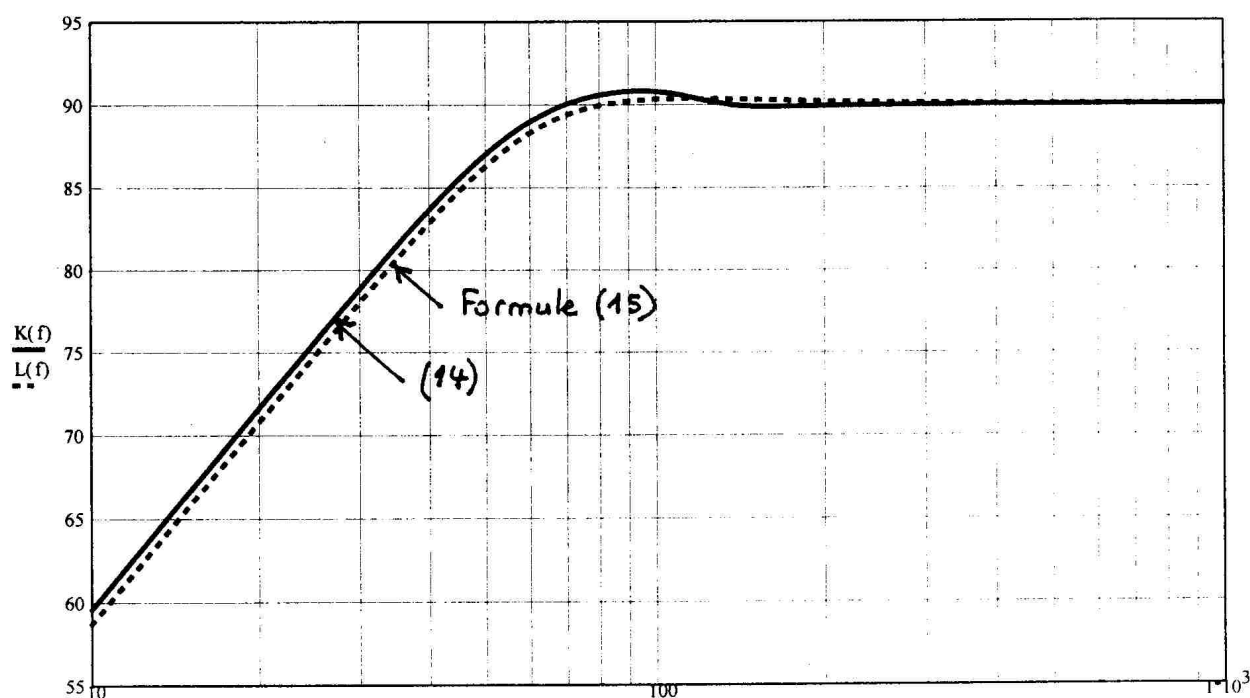


Figure 5 : Cas de deux haut-parleurs 20TK8 ($f_s = 51$ Hz, $V_{AS} = 29,5$ l, $Q_{TS} = 0.7$), $V_A = 15$ l.

On voit qu'il n'est pas opportun de placer l'un derrière l'autre des haut-parleurs trop différents en laissant un volume trop faible entre eux. Bien entendu, on pourrait obtenir

une meilleure complémentarité entre les deux haut-parleurs s'ils avaient un comportement voisin et que le HP interne avait une fréquence de résonance légèrement plus basse.

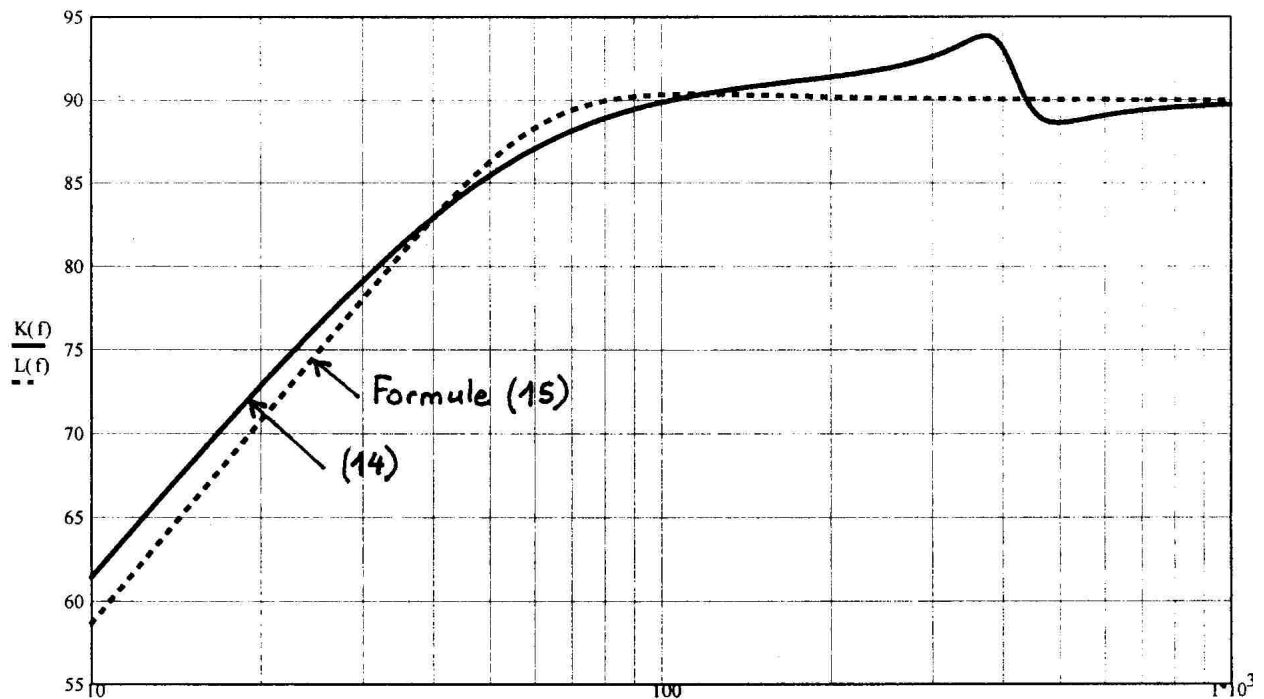


Figure 6 : Cas d'un haut-parleur 20TK8 et d'un HP arrière de $f_s = 36$ Hz, $V_{AS} = 61$ l, $Q_{TS} = 0.29$, $V_A = 1$ l. $\alpha = 1,3$, rapport des BL des deux haut-parleurs.

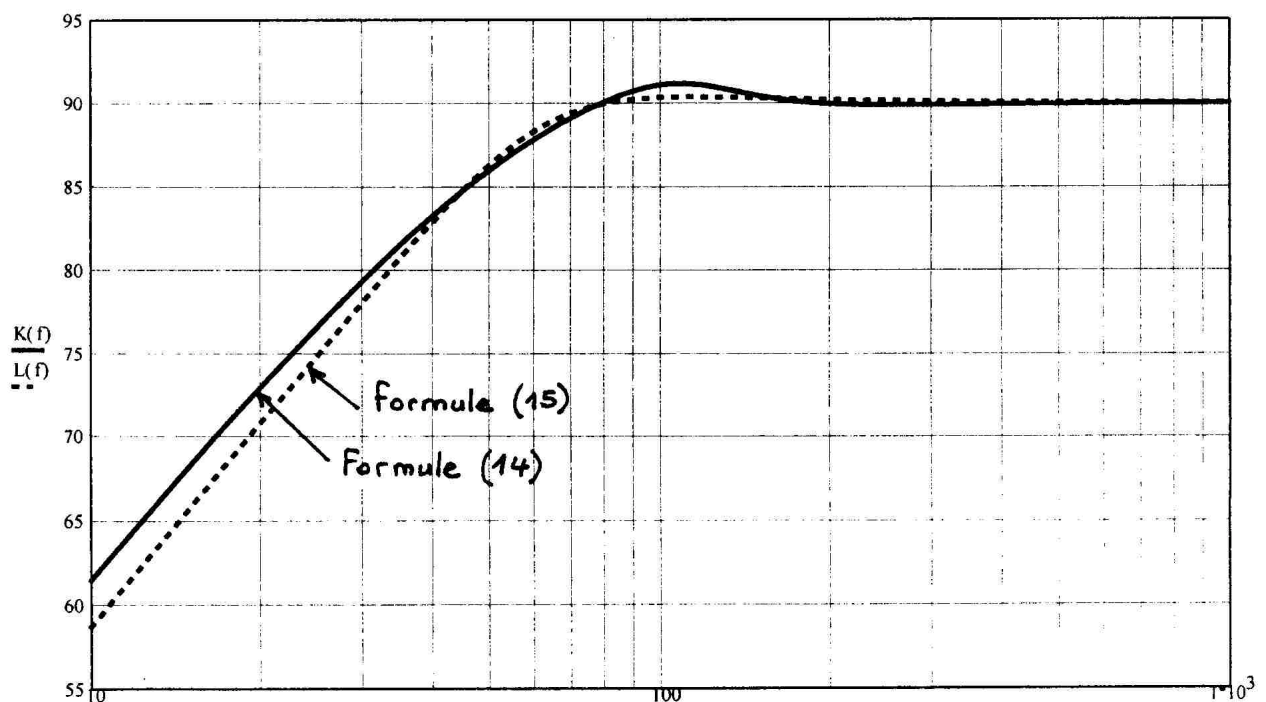


Figure 7 : Cas d'un haut-parleur 20TK8 et d'un HP arrière de $f_s = 36$ Hz, $V_{AS} = 61$ l, $Q_{TS} = 0.29$, $V_A = 15$ l. $\alpha = 1,3$, rapport des BL des deux haut-parleurs.

Avec les haut-parleurs dont nous disposons, nous observons donc que cette charge ne présente pas un grand intérêt. Nous aborderons le cas de la charge arrière bass-reflex dans le prochain numéro.

J.M. Grandemange.